

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra energetiky

## **Projekty jaderných bloků III.+ generace**

### Projects of Nuclear Power Plant III.+ Generation

Student: Matěj Kupka

Osobní číslo: KUP0092

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

OSTRAVA 2020

## Zadání bakalářské práce

Student: **Matěj Kupka**  
Studijní program: **B2341 Strojírenství**  
Studijní obor: **3907R009 Provoz energetických zařízení**  
Téma: **Projekty jaderných bloků III.+ generace  
Projects of Nuclear Power Plant III.+ Generation**  
Jazyk vypracování: **čeština**

### Zásady pro vypracování:

Proveďte rozbor projektů III.+ generace vhodných pro dostavbu jaderné elektrárny Dukovany. Popište I. a II. okruh, pasivní a aktivní bezpečnostní systémy, konstrukci jaderných reaktorů, parních generátorů, čerpadel a turbín a proveďte jejich vzájemné porovnání.  
Ve výpočtové části se zaměřte na tepelný výpočet svislého parního generátoru ve dvou-smyčkovém uspořádání I. okruhu s tepelným výkonem PG 1600 MW, parním výkonem PG 3200 t/h, tlak páry v II. okruhu 7 MPa, teplota napájecí vody 225 °C.

### Seznam doporučené odborné literatury:


Hejzlar, R.: *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.  
Mátl, O.: *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.  
Hezoučský, F.: *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020

  
doc. Ing. Stanislav Honus, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18. května 2020.

A handwritten signature in blue ink, reading "Kypka Matěj", written over a horizontal dotted line.

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18. května 2020.



Podpis studenta

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KUPKA, Matěj. *Projekty jaderných bloků III.+ generace*. Ostrava, 2020, 45 s. Bakalářská práce. VŠB-Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, katedra energetiky. Vedoucí práce Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Bakalářská práce se zabývá rozbořem projektů jaderných zařízení III.+ generace vhodných pro dostavbu jaderné elektrárny Dukovany. V úvodu je vypracován princip činnosti jaderné elektrárny, přehled I. a II. Okruhu, popis základních konstrukcí jaderných reaktorů a jejich rozdělení. Následuje přehled výrobců pro projekty III.+, jejich porovnání popis bezpečnostních prvků a řešerše všech jaderných bloků III.+ generace ve výstavbě v Evropě. Výpočtová část se zaměřuje na tepelný výpočet svislého parního generátoru ve dvou-smyčkovém uspořádání I. okruhu.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KUPKA, Matěj. *Projects of Nuclear Power Plant III.+ Generation*. Ostrava, 2020, 45 p. Bachelor thesis. VŠB-Technical university of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering. Thesis supervisor: Ing. Pavel Kolat, DrSc.

The bachelor's thesis deals with the analysis of III.+ generation nuclear facilities projects suitable for the completion of the Dukovany nuclear power plant. In the introduction, the principle of operation of a nuclear power plant, overview of I. and II. circuit, description of basic structures of nuclear reactors and their classification. The following is an overview of manufacturers for III. + projects, their comparison, a description of safety elements and a search of all III.+ generation nuclear units under construction in Europe. The calculation part focuses on the thermal calculation of a vertical steam generator in a two-loop arrangement of the I. circuit

# Obsah

SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ .....	8
1 ÚVOD.....	10
2 PRINCIP, FUNKCE A ZÁKLADNÍ ČÁSTI JADERNÉ ELEKTRÁRNY .....	11
2.1 Jaderný reaktor.....	12
2.1.1 Tlakovodní reaktor.....	12
2.1.2 Varný reaktor.....	12
2.1.3 Těžkovodní reaktor (CANDU).....	13
2.1.4 Plynem chlazený reaktor (Magmox) .....	13
3 GENERACE JADERNÝCH REAKTORŮ .....	15
3.1 První jaderné reaktory.....	15
3.2 Generace I .....	16
3.3 Generace II .....	17
3.4 Generace III .....	18
3.5 Generace III+ .....	19
3.6 Generace IV .....	20
4 PŘEHLED VÝROBCŮ JADERNĚ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ GENERACE III+ .....	21
4.1 Areva EPR .....	21
4.1.1 Základní bezpečnostní systémy projektu EPR .....	23
4.2 Rosatom VVER-1200 (AES-2006) .....	24
4.2.1 Základní bezpečnostní systémy projektu AES-2006.....	26
4.3 KEPCO APR-1400 .....	27
4.4 Toshiba-Westinghouse AP1000.....	28
4.4.1 Základní bezpečnostní systémy projektu AP1000.....	29
5 PROJEKTY JADERNÝCH BLOKŮ III+ GENERACE V EVROPĚ .....	32
5.1 Hinkley Point C .....	32
5.2 Flamanville 3.....	33
5.3 Olkiluoto 3 .....	34
5.4 Pakš 5 a 6.....	35
5.5 Mochovce 3 a 4 .....	36
6 Tepelný výpočet parního generátoru .....	38

6.1	Určení potřebných veličin z tabulek .....	39
6.2	Střední logaritmický spád .....	40
6.3	Určení součinitele přestupu tepla mezi vodou I a parovodní směsí II.....	41
6.3.1	Výpočet teplosměnné plochy, volba trubek .....	41
6.3.2	Určení součinitele přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubkou	41
6.4	Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí .....	43
6.5	Určení součinitele prostupu tepla .....	43
6.6	Kontrolní výpočty .....	43
6.7	Určení velikosti teplosměnné plochy.....	44
7	ZÁVĚR .....	45
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	47
9	SEZNAM OBRÁZKŮ .....	50

## SEZNAM POUŽITÉHO ZNAČENÍ

A	[1]	konstanta
G	[t·h <sup>-1</sup> ]	parní výkon
L	[m]	délka
L <sub>Σ</sub>	[m]	délka trubky
L <sub>stř</sub>	[m]	střední délka trubky
Nu	[1]	Nusseltovo číslo
P	[kg·h <sup>-1</sup> ]	množství páry
Pr	[1]	Prandlovo číslo
Pr <sub>st</sub>	[1]	Prandlovo číslo při střední teplotě trubky
Q	[MW <sub>t</sub> ]	Tepelný výkon
Re	[1]	Reynoldsovo číslo
S	[m <sup>3</sup> ]	plocha
S <sub>stř</sub>	[m <sup>3</sup> ]	průtočná plocha jedné trubky
S <sub>v</sub>	[m <sup>3</sup> ]	celková průtočná plocha
c <sub>p</sub>	[J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	měrná tepelná kapacita
d <sub>1</sub>	[m]	vnější průměr trubky
d <sub>2</sub>	[m]	vnitřní průměr trubky
i <sub>s</sub> '	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie napájecí vody
i <sub>s</sub> ''	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	entalpie syté kapaliny
k	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel prostupu tepla
l <sub>v</sub>	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	výparné teplo
m <sub>v</sub>	[kg · s <sup>-1</sup> ]	množství primární vody
n	[ks]	počet trubek
p <sub>1</sub>	[MPa]	tlak média v primárním okruhu
p <sub>2</sub>	[MPa]	tlak syté páry v sekundárním okruhu
q	[W · m <sup>-2</sup> ]	střední tepelný tok
t <sub>1</sub>	[°C]	teplota primární vody na vstupu



$t_2$	[°C]	teplota primární vody na výstupu
$t_{nv}$	[°C]	teplota napájecí vody
$t_s$	[°C]	teplota syté páry
$\Delta t$	[°C]	rozdíl teplot
$\Delta t_1$	[°C]	rozdíl teplot
$\Delta t_2$	[°C]	rozdíl teplot
$\Delta t_{stř \log}$	[°C]	střední logaritmický teplotní spád
$v$	[m <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]	měrný objem
$w$	[m · s <sup>-1</sup> ]	rychlost proudění média
$\alpha$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\alpha_1$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla voda-trubka
$\alpha_2$	[W · m <sup>-2</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla voda-trubka
$\eta$	[Pa · s <sup>-1</sup> ]	dynamická viskozita
$\lambda$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti média
$\lambda_{st}$	[W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti stěny
$\vartheta$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	kinetická viskozita
$\rho$	[kg · m <sup>-3</sup> ]	měrná hmotnost média

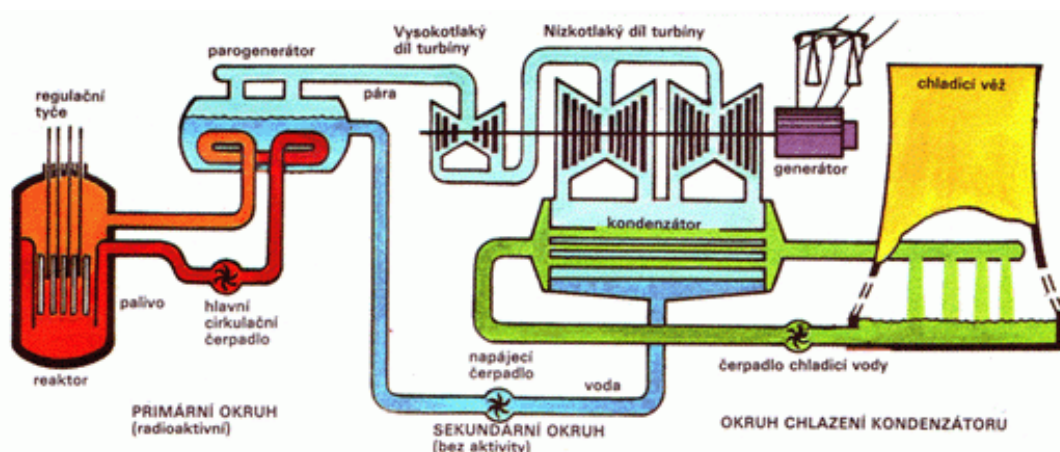
# 1 ÚVOD

Vzrůstající spotřeba energie klade velké nároky na energetické zdroje, které dnes musí dosahovat obrovských výkonů, při co nejlepší účinnosti. Toho nejlépe dosahují klasické tepelné elektrárny, jako například uhelné, paroplynové nebo jaderné. V dnešní době se jako jedno z hlavních kritérií při výstavbě nových energetických výroben zohledňuje ekologické zatížení. Zohledňuje se nejen provoz, ale i získávání energetických zdrojů. V tomto aspektu, vedle slunečních, vodních a větrných elektráren, vede z klasických zdrojů jaderná elektrárna.

Jaderná elektrárna se však v dnešní době nečelí nijak valné pověsti. Můžou za to hlavně velké nehody s únikem radioaktivních látek do okolí z minulých let, především nehody na jaderných elektrárnách Three Mile Island, Černobyl a Fukušima. Tyto faktory nutí výrobce jaderně technologických zařízení, ke zlepšování aktivních i pasivních bezpečnostních prvků. Nejmodernější III.+ generace jaderných reaktorů má tyto bezpečnostní prvky na tak vysoké úrovni, že se počítá i se situacemi, jejichž pravděpodobnost výskytu se pohybuje řádově 1 : 1 000 000. I přesto jsou jaderné elektrárny prozatím jedinou alternativou k neekologickým uhelným elektrárnám.

## 2 PRINCIP, FUNKCE A ZÁKLADNÍ ČÁSTI JADERNÉ ELEKTRÁRNY

Jaderná elektrárna je výrobní elektrické energie respektivně technologické zařízení, sloužící k přeměně vazebné energie jader těžkých prvků na elektrickou energii. V principu se jedná o tepelnou elektrárnu, ve které se energie získaná jaderným reaktorem používá k výrobě páry, která pohání parní turbínu a alternátor pro výrobu elektrické energie.



Obr. 2.1 Schéma tlakovodní jaderné elektrárny [2]

Jednou z hlavních výhod jaderné elektrárny je, že se jedná o intenzivní spolehlivý zdroj, jehož provoz je jen slabě ovlivňován vnějšími podmínkami. Právě proto se používá hlavně v základním zatížení. Další výhodou je to, že množství spotřebovaného paliva je velmi malé. Například jaderný blok o výkonu 1000 MW potřebuje ročně přibližně 32 tun paliva. Také objem odpadu (vyhořelého paliva) je malý. Další výhodou je malá plocha zabraná elektrárnou na jednotku dodávané elektrické energie, jde tedy o velmi koncentrovaný zdroj. Při normálním provozu se také jedná o velmi ekologický zdroj. Problémy s ekologickými dopady mohou nastat pouze v případě havárie.

Ve většině dnešních jaderných elektráren se jako palivo používá obohacený uran. Jedná se o přírodní uran, ve kterém je zvýšen obsah izotopu  $^{235}\text{U}$  z 0,7 % na 2-5 %. Nejpoužívanější metody obohacování jsou difúze a odstředivková metoda, nebo kombinace těchto metod. Výměna paliva probíhá kampanovitě (reaktor se odstaví a provede se výměna paliva) nebo kontinuálně (vyměňuje se pouze část paliva za provozu zavážecím strojem). [1]

V současné době je na světě v celkem 30 zemích provozováno 445 jaderných reaktorů o celkovém elektrickém výkonu 392 300 MW, čímž jaderné elektrárny pokrývají kolem 15 % z celkové světové spotřeby elektrické energie.

Jaderné elektrárny lze nejlépe rozdělit podle počtu okruhů:

- Jednookruhová-využívá varné reaktory jejichž chladivem je lehká voda, která jde z reaktoru přímo do turbíny
- Dvouokruhová-primární a sekundární okruh je oddělen parogenerátorem. Používá tlakovodní reaktory. V současnosti se jedná o nejpoužívanější typ jaderné elektrárny.

- Tříokruhová-využívá rychlé reaktory jejichž chladivem je tekutý sodík, v meziokruhu je opět tekutý sodík (při poruše nesmí dojít ke styku vody a radioaktivního sodíku)

## 2.1 Jaderný reaktor

Jedná se o nejdůležitější technologické zařízení jaderné elektrárny. V jaderném reaktoru probíhá řízená řetězová reakce při které se uvolňuje tepelná energie. Tato energie se přestupuje do chladiva, které se poté mění na páru, ze kterou můžeme stejně jako u klasické tepelné elektrárny použít k výrobě elektrické energie.

Jádra izotopu  $^{235}\text{U}$  zasažená pomalými neutrony se rozpadají na jádra lehčích prvků a současně se uvolní 2-3 rychlé neutrony. Rozpadlé jádra se vzájemně odpuzují a velkou rychlostí se od sebe rozlétaří. Při jejich zabrzdění srážkami s ostatními atomy paliva se kinetická energie mění na teplo. Uvolněné neutrony mohou způsobit štěpení dalších uranových jader a jaderná reakce může dál probíhat jako řízená řetězová reakce. Tyto neutrony však mají příliš velkou kinetickou energii a je nutné je zpomalit srážkou s jiným jádrem stejné velikosti. Tato látka se nazývá moderátor. V případě, že je nutné řetězovou reakci zastavit nebo utlumit je potřeba použít materiál, který dokáže absorbovat velké množství neutronů. Jako absorbátory se nejčastěji využívá kadmium a bór. [2]

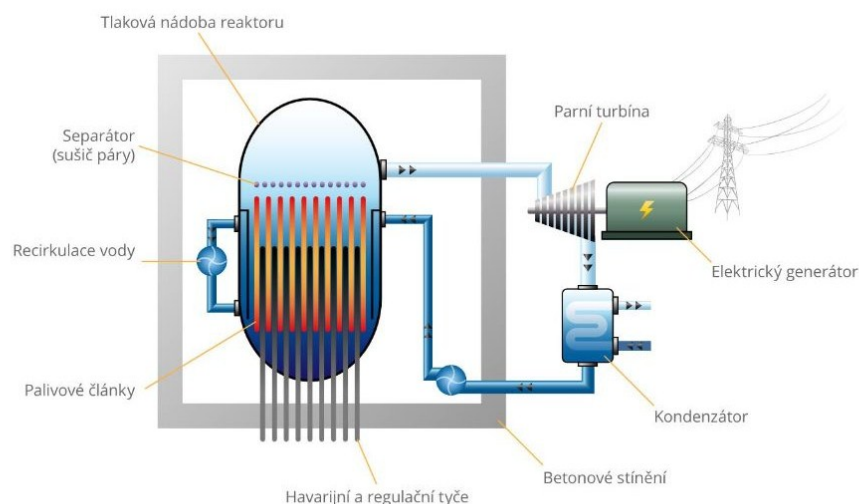
Řetězová reakce probíhá v aktivní zóně. Ta je umístěna v reaktorové nádobě, ve které jsou umístěny i regulační a bezpečnostní tyče (fungující jako absorbátor) a palivové tyče. Reaktorová nádoba je umístěna v ochranném kontejmentu, který většinou tvoří celý reaktorový sál.

### 2.1.1 Tlakovodní reaktor

V dnešní době nejrozšířenější typ (zhruba 60 % všech energetických reaktorů). Pro svou bezpečnost jsou používány i jako pohony jaderných ponorek a torpédoborců. Moderátorem je obyčejná voda, která proudí v primárním okruhu pod vysokým tlakem a nedochází tudíž k jejímu varu. Voda o teplotě přibližně 300 °C z primárního okruhu ohřívá v parogenerátoru vodu sekundárního okruhu, která se mění v páru a přivádí se na turbínu. Palivo je ve formě tabletek obohaceného oxidu uraničitého uspořádané do palivových proutků, které tvoří palivové tyče. [3]

### 2.1.2 Varný reaktor

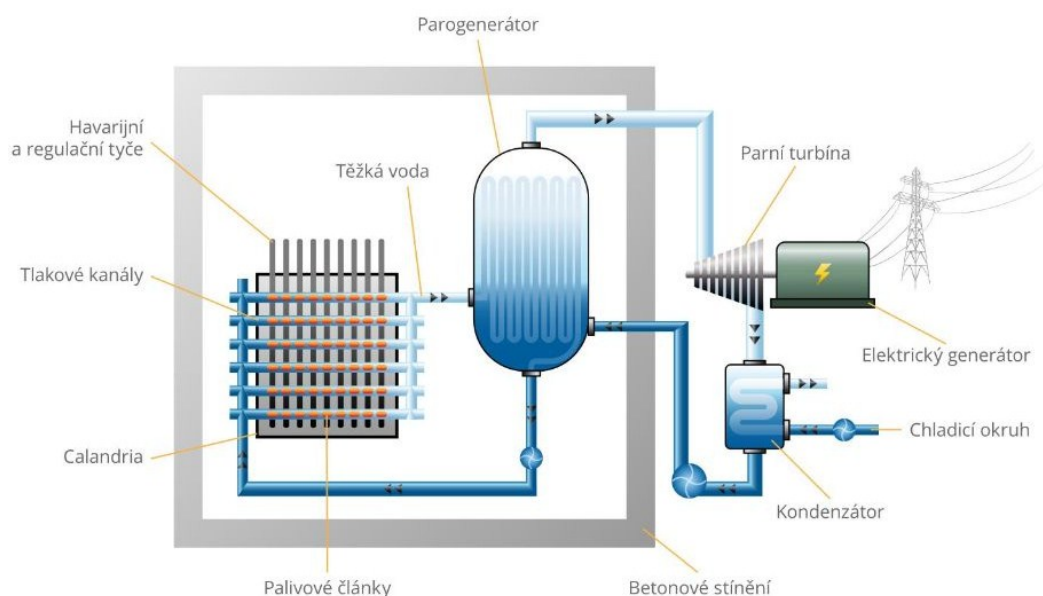
Aktivní zóna je podobná aktivní zóně tlakovodního reaktoru. Moderátorem i chladivem je obyčejná voda. Voda se ohřívá až do bodu varu přímo v tlakové nádobě, přičemž v horní části reaktoru se hromadí ve formě páry. Pára se zbaví vlhkosti a přivádí se přímo na vstup turbíny. Elektrárny s varnými reaktory tedy nemají na rozdíl od elektráren s tlakovodními reaktory parogenerátor, jsou tedy pouze jednookruhové. [3]



**Obr. 2.2 Schéma varného reaktoru [3]**

### 2.1.3 Těžkovodní reaktor (CANDU)

Aktivní zóna je konstrukčně řešena v nádobě tvaru ležícího válce, která je osazena horizontálními prostupy pro tlakové trubky. Těžká voda z primárního chladicího okruhu předává své teplo obyčejné vodě v parogenerátoru, odkud je vedena pára na turbínu. Palivem je přírodní uran, chladivem a moderátorem těžká voda  $D_2O$ . [3]

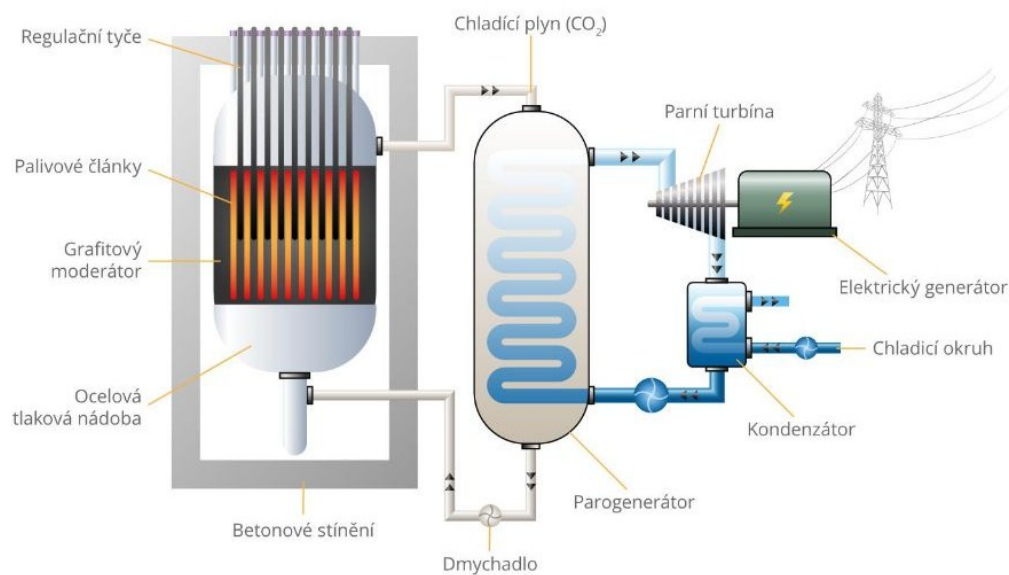


**Obr. 2.3 Schéma reaktoru CANDU [3]**

### 2.1.4 Plynem chlazený reaktor (Magnox)

Palivem je přírodní kovový uran ve formě tyčí pokrytých oxidem magnezia. Aktivní zóna se skládá z grafitových bloků (sloužící jako moderátor), kterými prochází kanály s palivovými tyčemi. Aktivní zóna je uzavřena v ocelové tlakové nádobě se silným betonovým stíněním. Palivo se

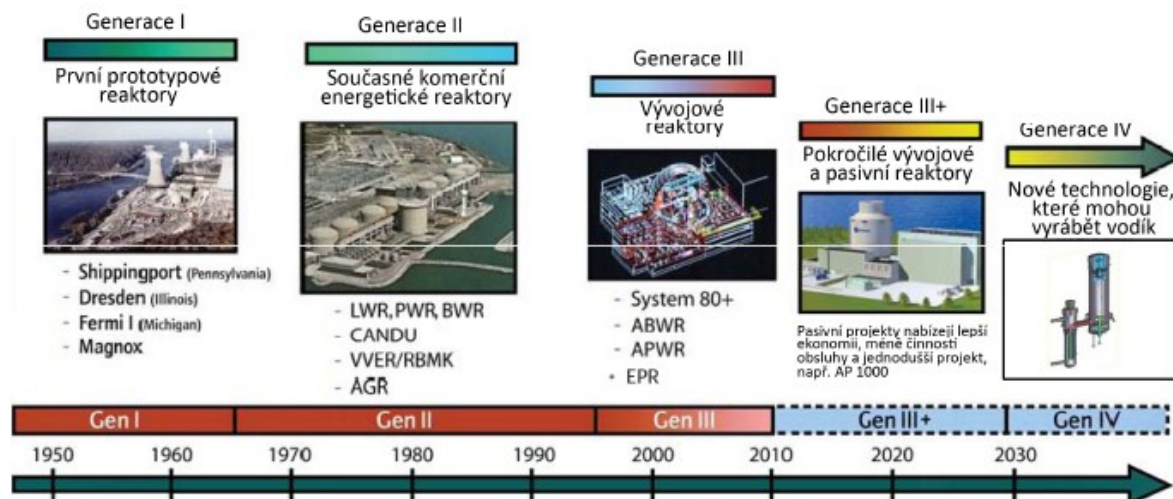
vyměňuje za provozu. Chladivem je oxid uhličitý, který po ohřátí v aktivní zóně proudí do parogenerátoru. [3]



**Obr. 2.4 Schéma reaktoru MAGNOX [3]**

### 3 GENERACE JADERNÝCH REAKTORŮ

Rozdělení jaderných reaktorů do generací je způsob označení vyspělosti reaktorů používaných v jaderných elektrárnách. Byl vytvořen Mezinárodním fórem generace IV roku 2001 pro popis technologické a bezpečnostní úrovně již vyvinutých i plánovaných nových typů reaktorů.

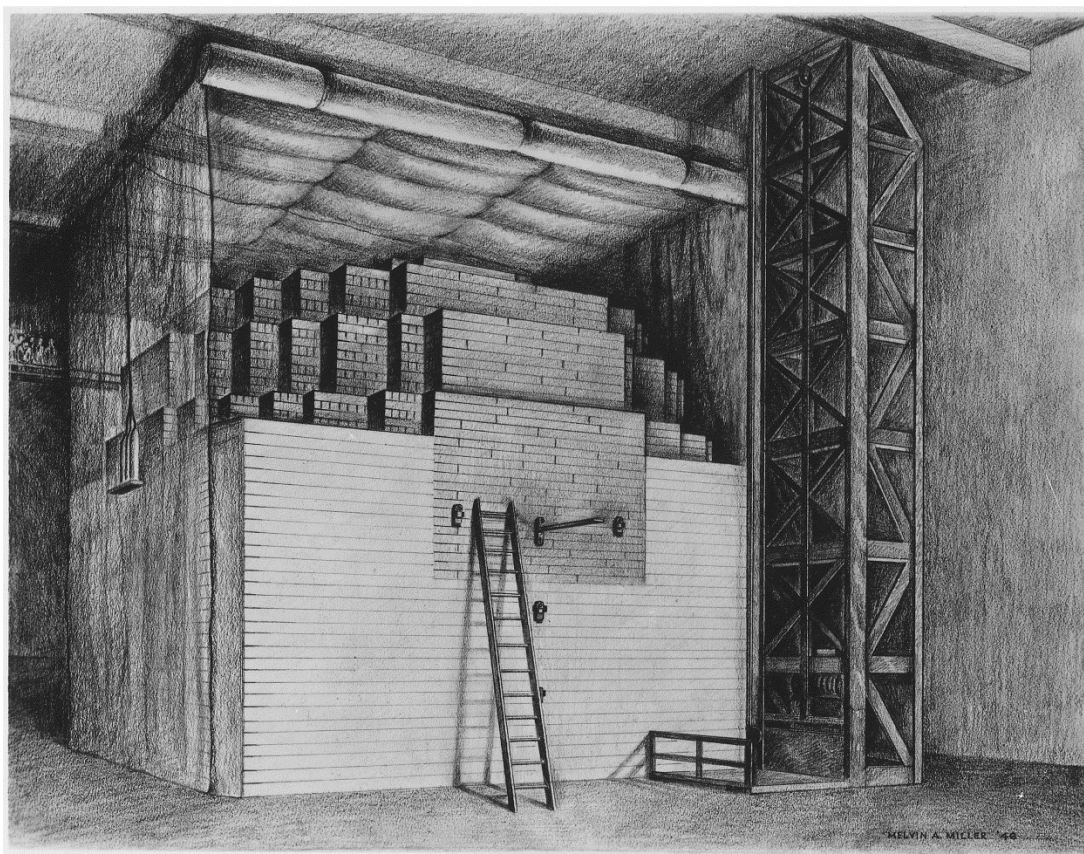


Obr. 3.1 Historický vývoj generací jaderných reaktorů [6]

#### 3.1 První jaderné reaktory

Historie jaderných reaktorů spadá až do období přelomu 30. a 40. let 20. století, kdy první úspěšný pokus s jaderným štěpením provedli v roce 1938 v Berlíně Otto Hahn, Lise Meitner a Fritz Strassman.

Během 2. světové války se rozběhl jaderný v mnoha zemích převážně za účelem vzniku a výroby jaderných zbraní. První řízená řetězová reakce se povedla uskutečnit týmu vědců vedeného Enricem Fermim 2. prosince 1942 v reaktoru Chicago Pile-1 (CP-1) na půdě Chicagské univerzity. Jednalo se tak o první člověkem vyrobený jaderný reaktor na světě. Tento reaktor však nesloužil k energetickým účelům, ale k výrobě plutonia do jaderných zbraní. [4]



**Obr. 3.2 Náčrt reaktoru CP-1 [4]**

Elektřina z jaderné energie byla poprvé vyrobena 20. prosince 1951 na experimentálním reaktoru EBR-1 (stát Idaho, USA), kdy byly rozsvíceny čtyři žárovky. Později reaktor dosahoval elektrického výkonu 200 kW.

První jaderná elektrárna, která dodávala proud do sítě, byla zprovozněna v Obninsku v bývalém Sovětském svazu. Připojena do sítě byla 26. června 1954 a dosahovala výkonu 5 MW.

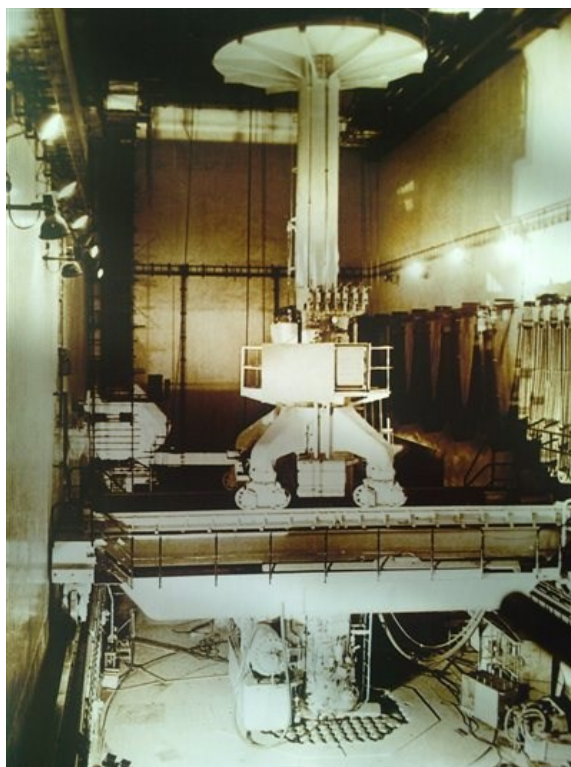
Za první komerční jadernou elektrárnu je však považována elektrárna Calder Hall ve Velké Británii. Ta byla k síti poprvé připojena 27. srpna 1956 a její 4 bloky produkovaly elektrický výkon až 4x60 MW. [4]

### 3.2 Generace I

Do první generace počítáme jaderné reaktory, které byly vyvinuty a postaveny v 50. a 60. letech 20. století. Zpočátku bylo provozováno velké množství různých typů experimentálních reaktorů, ale pro využití v energetice se uplatnily jen některé. Jednalo se o prototypy komerčních reaktorů, na kterých bylo ověřováno, zda je možné používat jaderné reaktory k výrobě elektrické energie. Vzhledem k tomu, že stavba jaderných elektráren byla v té době zcela novým technickým oborem, reaktory na počátku své éry měly pouze základní bezpečnostní prvky, které byly na základě provozních zkušeností rozšiřovány.

Některé typy dosáhly významného energetického rozšíření, například britský Magnox a francouzský UNGG, které jsou chlazeny oxidem uhličitým a moderovány grafitem. [5]





**Obr. 3.3 Reaktorový sál JE Jaslovské Bohunice A1 [5]**

### 3.3 Generace II

Rozvoj této generace je spojen s ropnou krizí ze 70. let 20. století, kdy došlo k obrovským investicím do jaderné energetiky.

Po zkušenostech s provozem jaderných ponorek a experimentálních reaktorů se prosadily pro energetické účely především lehkovodní typy reaktorů, ať už varný či tlakovodní. Oproti ostatním typům měly spoustu provozních i ekonomických výhod. Lehká voda je relativně levná a dostupná, reaktory mají poměrně malé rozměry a technologie obohacování paliva byla technicky dobře zvládnuta. V současnosti je většina reaktorů dodávajících elektrickou energii právě tohoto typu.

Elektrárny této generace měly více bloků. Každá byla projektována a konstruována individuálně podle konkrétní lokality, ale byly využívány stejné principy a projekty na sebe navazovaly. Největší zastoupení mají lehkovodní tlakové reaktory, které dodnes představují většinu provozovaných bloků. Patří mezi ně i reaktory typu VVER-440 a VVER-1000 používané v jaderných elektrárnách Dukovany a Temelín.

Druhým nejvyužívanějšími typy reaktorů jsou lehkovodní varné reaktory, které doznaly největšího rozšíření ve Spojených státech, Západní Evropě a Japonsku. Ve Velké Británii byl vyvinut grafitový reaktor chlazený oxidem uhličitým AGR (Advanced Gas-cooled Reactor). Kanada využívala pro své jaderné elektrárny reaktory chlazené i moderované těžkou vodou typu CANDU (CANada Deuterium-Uranium), k jejichž největším výhodám patří používání neobohaceného uranu jako paliva. [5]

Rusko kromě reaktorů VVER stavělo také lehkovodní varné reaktory moderované grafitem RBMK a AMB. Tohoto typu byl i reaktor v jaderné elektrárně Černobyl, kde došlo k největší havárii v historii jaderné energetiky. Po této havárii došlo v tehdejším Sovětském svazu k přehodnocení bezpečnosti a po podstatných úpravách je 11 bloků s reaktory RBMK-1000 bezpečně provozováno dodnes.



**Obr. 3.4 Jaderná elektrárna Dukovany [5]**

Původně se u této generace počítalo s délkou provozu 30 až 40 let, v závislosti na konkrétním typu a zemi, ale během provozu a likvidace nejstarších bloků byly získány nové zkušenosti a znalosti, které umožnily prodloužit dobu provozu na 60 let (s výhledem až na 80 let). Zkušenosti získané během provozu a především havárií vedly k podstatnému zdokonalení bezpečnostních systémů, což přineslo zavedení tzv. hloubkové ochrany, fyzické separace a diverzifikace z hlediska bezpečnostně důležitých systémů. [5]

#### Zástupci reaktorů generace II:

- Tlakovodní reaktor PWR, VVER chlazené i moderované lehkou vodou
- Tlakovodní reaktor CANDU chlazený i moderovaný těžkou vodou
- Varný reaktor BWR chlazený i moderovaný lehkou vodou
- Varný reaktor RBMK chlazený lehkou vodou a moderovaný grafitem
- Varný reaktor EGP-6 chlazený lehkou vodou a moderovaný grafitem
- Těžkovodní reaktory CANDU
- Plynem chlazený AGR chlazený oxidem uhličitým a moderovaný grafitem

### **3.4 Generace III**

Aby se zabránilo jakýmkoliv možnostem havárie ohrožující zdraví lidí a zlepšila spolehlivost i ekonomika provozu elektráren, bylo potřeba navrhnout a připravit reaktory nové generace. Tyto reaktory většinou vycházejí z úspěšných modelů reaktorů generace II, ale mají daleko lepší bezpečnostní i užitkové vlastnosti. Jedná se o standardizované typy, což zjednodušuje povolenací řízení při výstavbě elektrárny a celkově snižuje náklady a čas výstavby (náklady na výstavbu tvoří

největší část celkových nákladů). Jednodušší a robustnější konstrukce umožňuje zjednodušení provozu a větší odolnost proti lidským chybám. Projektová doba provozu by měla být 60 let. Také je velmi silně redukována pravděpodobnost, že dojde k souhře událostí, které by mohly způsobit přehřátí paliva v aktivní zóně a jeho roztavení. Zmenšení spotřeby uranu i objemu radioaktivního odpadu umožňuje vysoké vyhoření paliva. Kompenzovat zhoršování vlastností by měly izotopy absorbující neutrony v palivu, které se v průběhu spalování odbourávají a jejich úbytek kompenzuje zhoršující se vlastnosti paliva. To umožňují prodloužení intervalu mezi výměnami paliva. [6]

Mezi reaktory tohoto typu, které jsou dnes v provozu, patří vylepšený model reaktoru CANDU-6 využívaný v Kanadě, Rumunsku, Jižní Koreji, Číně nebo Argentíně. Těžké havárie v jaderných elektrárnách Three Mile Island a Černobyl (elektrárny s reaktory generace II) postihly tuto generaci negativním společenským názorem. To je hlavním důvodem, proč z této generace jsou v provozu pouze reaktory typu CANDU 6. [5]



**Obr. 3.5 druhý blok kanadské jaderné elektrárny Gentilly – první reaktor typu CANDU-6 [5]**

### 3.5 Generace III+

Rozdělení reaktorů mezi generaci III a III+ nemá pevnou hranici. U reaktorů generace III+ je největší důraz kladen na pasivní bezpečnostní prvky. Možnost lidské chyby je významně snížena. Řešení krizových situací probíhá automaticky na základě přírodních zákonitostí a nepotřebuje zásah operátora či kontrolního systému. Je založeno na gravitaci, přirozeném proudění, odolnosti proti tlaku či teplotám. Je požadováno, aby tyto systémy zajistily bezpečný provoz i v případě nouzového stavu 72 hodin bez nutnosti zásahu člověka. Kontejnment a celková konstrukce budov zajišťuje zvýšenou odolnost proti pádu letadla a dalším vnějším vlivům, jako jsou třeba zemětřesení nebo hurikány. [5]

Zařazujeme zde:

- tlakovodní reaktory EPR, AP1000, VVER-1200, CAP-1400, APWR
- těžkovodní tlakový reaktor ACR-1000
- varný reaktor ESBWR

### 3.6 Generace IV

Reaktory této generace se od předchozích generací liší zásadním způsobem. Nejde o další evoluční stupeň, ale její zástupci navazují na některé experimentální typy reaktorů z 50. a 60. let. Jedním z typických zástupců jsou rychlé sodíkem chlazené reaktory, které jsou v různých zemích postupně vyvíjeny.

Cílem projektantů reaktorů IV. generace je dosáhnout udržitelného vývoje jaderné energetiky, ekonomicky konkurenceschopného provozu s ostatními zdroji energie a vysoké úrovně bezpečnosti (včetně tzv. inherentní bezpečnosti – tomu, aby nenastala vážná havárie brání již samotný princip fungování reaktoru). Tyto reaktory dále neumožňují zneužití používaných jaderných materiálů k výrobě jaderných zbraní. [5]

Mezinárodní spolupráce při vývoji reaktorů IV. generace probíhá také v rámci Mezinárodního fóra pro generaci IV, které bylo založeno v roce 2001. Tato organizace reprezentuje vlády států, které využívají jadernou energetiku v současnosti a předpokládají její velmi intenzivní využívání i v následujících desetiletích. Účel Mezinárodního fóra pro generaci IV je umožnit efektivní průběh vývoje nových reaktorů a jejich využití pro co nejširší mezinárodní komunitu. V roce 2002 představilo fórum návrh šesti základních konceptů nových reaktorů, které naplňují požadavky na budoucí rozvoj jaderné energetiky. [5]

Do této skupiny reaktorů patří:

- Sodíkem chlazený rychlý reaktor SFR
- Vysoko-teplotní reaktor VHTR
- Reaktor s roztavenými solemi MSR
- Superkritický, vodou chlazený reaktor SCWR
- Rychlý reaktor chlazený plynem GFR
- Olovem chlazený rychlý reaktor LFR

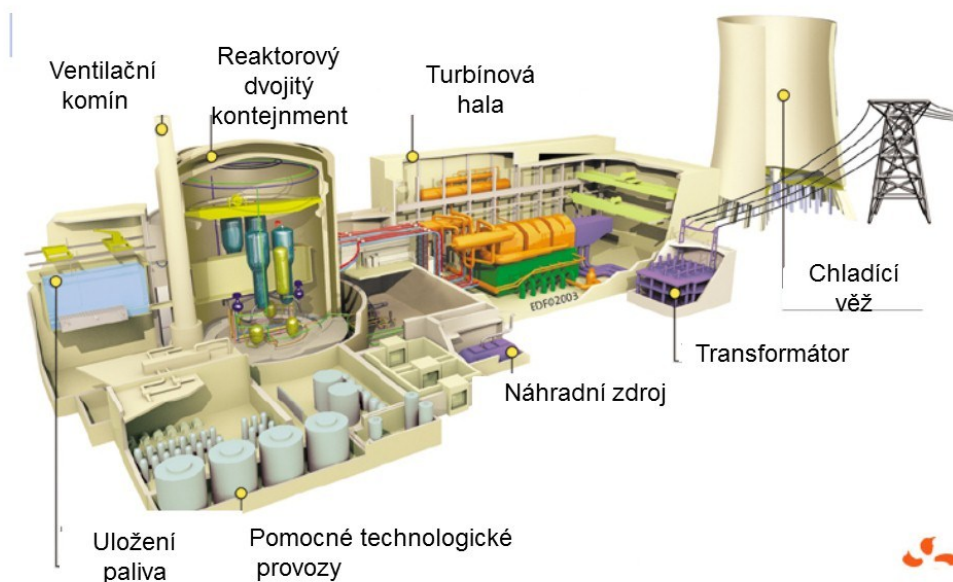
## 4 PŘEHLED VÝROBCŮ JADERNĚ ENERGETICKÝCH ZAŘÍZENÍ GENERACE III+

V současné době na trhu figurují tito výrobci:

- **Areva EPR (Francie)**
- **Rosatom VVER-1200 (Rusko)**
- **KEPCO APR1400 (Jižní Korea)**
- **Toshiba-Westinghouse AP1000 (Japonsko/USA)**
- Areva Kerena BWR (Francie/Německo)
- Areva-Mitsubishi Atmea (Francie/Japonsko)
- CNGPC CPR-1000 (Čína)
- GE-Hitachi ESBWR (USA/Japonsko)
- Mitsubishi APWR (Japonsko)
- SNC Lavalin CANDU (Kanada)

### 4.1 Areva EPR

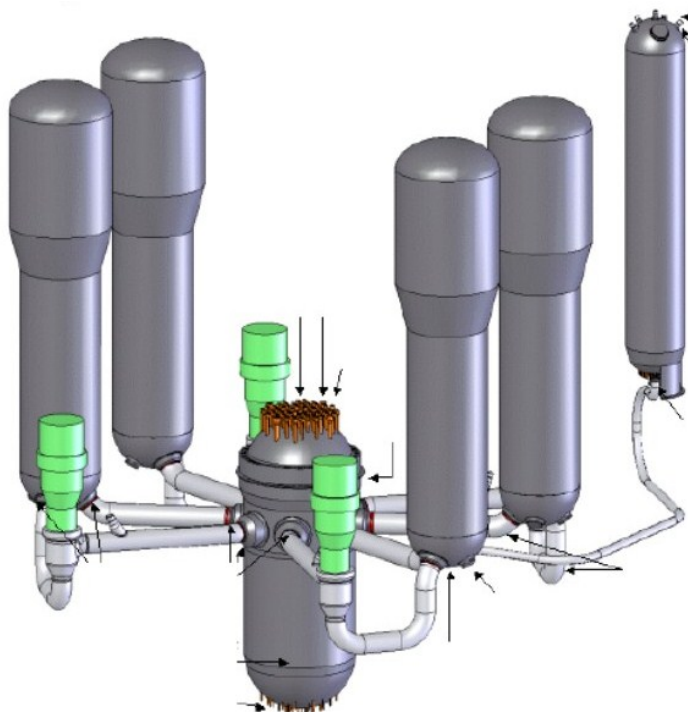
Reaktor EPR původně vznikl jako společný záměr firem Framatome a Siemens, jejichž cílem bylo vyvinout koncept reaktoru, který by mohl být licencován a stavěn ve všech evropských zemích – zkratka EPR pochází z původního názvu European Pressurised Reactor. Koncept obsahuje prvky z konstrukce posledních typů reaktorů obou společností – N4 Framatomu a Konvoi v případě společnosti Siemens. V roce 2002 byl projekt transformován na divizi nové, francouzským státem ovládané, jaderné společnosti Areva. Siemens svoje aktivity ukončil v roce 2010, od té doby je plně ve vlastnictví Arevy. [7]



**Obr. 4.1 Celková koncepce projektu EPR [13]**

U tohoto reaktoru je kladen důraz na účinná a jednoduchá bezpečnostní opatření a vysoký výkon. Jako palivo může používat buď uran obohacený na pět procent, nebo kombinaci uranu a plutonia. Samotná aktivní zóna se skládá z 241 čtvercových palivových kazet a každá kazeta obsahuje 265 palivových tyčí a 24 vodičích trubek klastrové regulace. Reaktivita se řídí hlavně změnou koncentrace kyseliny borité v chladicím médiu, nebo pomocí řídicích regulačních tyčí.

Maximální elektrický výkon tohoto reaktoru je 1475 MWe a tepelný výkon 4590 MWt. Primární okruh tvoří 4 smyčky (4 horké a 4 studené větve), přičemž každá ze smyček má jeden vertikální parogenerátor a jedno hlavní cirkulační čerpadlo. Oproti jiným podobným projektům má EPR zvětšeny hlavní komponenty (tlaková nádoba, kompenzátor objemu a vertikální parogenerátory), díky čemuž se zvětšila zásoba vody v primárním okruhu. V primárním okruhu je tlak 15,5 MPa s průtokem 28330 m<sup>3</sup>/h. Vstupní teplota vody v primárním okruhu je 295,9 °C a výstupní 327,2 °C. Samotná reaktorová nádoba má výšku 11 m a šířku 5,5 m. Obsahuje také tzv. těžký reflektor, což je vnitřní výstelka z nerezové oceli, která slouží ke snížení neutronového toku dopadajícího na tlakovou nádobu a částečně odráží neutrony zpět do aktivní zóny. [8]



**Obr. 4.2 čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu EPR [13]**

Mezi bezpečnostní prvky patří gravitačně hnané havarijní tyče, větší objem parogenerátorů, než je nezbytně nutné pro předání potřebného výkonu, dvojitá obálka kontejnmentu, lapač aktivní zóny.

Kontejnment chrání jaderný reaktor před vnějšími vlivy. Vnitřní stěna kontejnmentu je zhotovena z předepjatého betonu s kovovou výstelkou a vnější stěna je z armovaného betonu. [9]

#### 4.1.1 Základní bezpečnostní systémy projektu EPR

Bezpečnostní systémy projektu EPR jsou založeny na principu zajištění požadované úrovně bezpečnosti za všech podmínek a stavů (normální, abnormální, havarijní a provozní stavy) a zabránění vzniku (resp. snížení pravděpodobnosti vzniku) těžkých nadprojektových havárií.

Tyto principy jsou následující:

- Zjednodušení bezpečnostních systémů
- Redundance subsystémů bezpečnostních systémů (4x100 %)
- Konstrukční oddělení těchto subsystémů a nezávislost bezpečnostních systémů

Mezi bezpečnostní prvky patří gravitačně hnané havarijní tyče, větší objem parogenerátorů, než je nezbytně nutné pro předání potřebného výkonu, dvojitá obálka kontejnmentu, lapač aktivní zóny, systém havarijního doplňování, systém odvodu zbytkového tepla, systém havarijního napájení parogenerátorů, systém odvodu zbytkového tepla z kontejnmentu.

Kontejnment chrání jaderný reaktor před vnějšími vlivy. Vnitřní stěna kontejnmentu je zhotovena z předepjatého betonu s kovovou výstelkou a vnější stěna je z armovaného betonu. [9]

**Lapač roztavené aktivní zóny.** U projektu EPR je lapač roztavené aktivní zóny nádrž o objemu 170 m<sup>3</sup>, která bezpečně zajišťuje zadržení roztavené aktivní zóny. Zároveň je zaručeno efektivní chlazení taveniny. Jakmile tavící se aktivní zóna protaví dno reaktorové nádoby je tavenina zadržena v prostoru šachty reaktoru. Účinnost systému zaručuje stabilizaci roztavené aktivní zóny během několika hodin a jeho ztuhnutí během několika dní.

**Havárie typu LOCA.** Jakmile dojde k prasknutí potrubí, sníží se tlak o několik MPa, přičemž chladicí médium unikající z primárního potrubí se mění okamžitě na páru. V tomto okamžiku se začne snižovat hladina v kompenzátoru objemu, aby byla zajištěna dodávka chladiva do aktivní zóny. Následuje odstavení reaktoru a turbíny. Dále je nutné snížit průtok napájecí vody do parogenerátoru tím, že jsou uzavřeny hlavní napájecí hlavy. Parogenerátor je pak napájen přes menší řízené armatury. Systém napájení parogenerátoru je pojištěn pomocným a havarijním napájením parogenerátoru pro případ, že selže napájení hlavní. Během všech těchto činností se nadále snižuje hladina v kompenzátoru objemu a zároveň se zapojuje středotlaké a nízkotlaké havarijní doplňování.

## 4.2 Rosatom VVER-1200 (AES-2006)

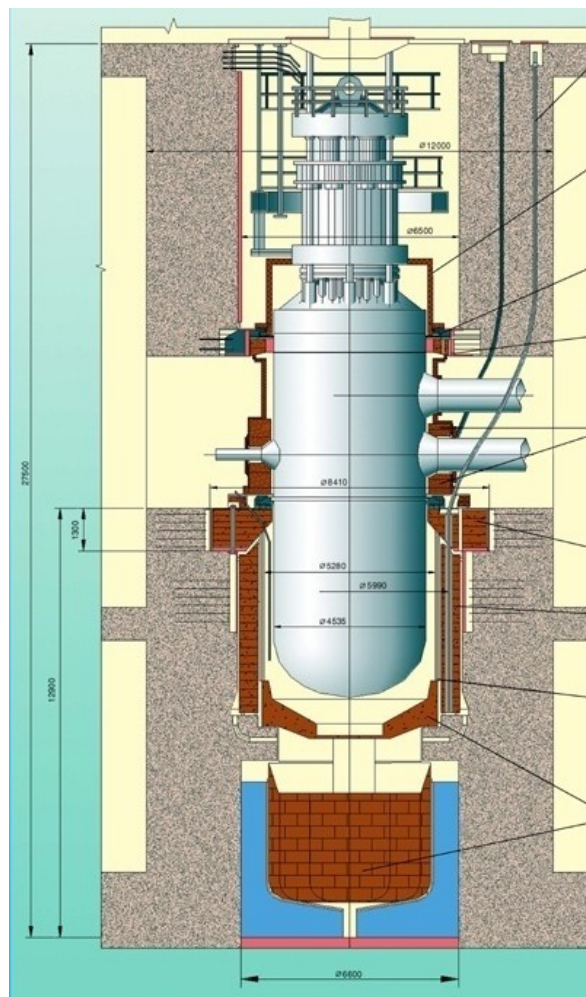
Lehkovodní tlakový reaktor VVER-1200 typ 491 je vyvíjen ruskou společností Hidropres, která spadá pod státní ruskou společnost Rosatom. Tento reaktor dosahuje elektrického výkonu 1170 MWe a tepelného výkonu 3200 MWt. V podstatě se jedná o modernizovaný a výkonnější reaktor VVER-1000, který je například provozovaný v jaderné elektrárně Temelín.

Projekt AES-2006 oproti předchozím projektům VVER dosáhl zlepšení především v těchto parametrech:

- Zvýšení elektrického výkonu.
- Zvýšení tepelného výkonu.
- Zvýšení tlaku páry na výstupu z generátoru.
- Zmenšení tlakových ztrát v hlavním parovodu na 0,2 MPa.
- Konstrukce kontejmentu.
- Bezpečnostní systémy.
- Programovatelný digitální systém kontroly a řízení.
- Účinnost jaderné elektrárny.
- Doba výstavby JE (54 měsíců).
- Životnost JE (60let).

Primární okruh má 4 smyčky a tedy i 4 horizontální parogenerátory (například VVER-440 má 6 parogenerátorů, každý se svým vlastním cirkulačním čerpadlem a potrubím, VVER-1000 má 4 smyčky). Tlak v primárním okruhu reaktoru VVER-1200 dosahuje 16,2 MPa což je srovnatelné s VVER-440 i VVER-1000. Teplota na výstupu z reaktoru je přibližně 330 °C a chladicí médium na vstupu do reaktoru má přibližně 300 °C.





**Obr. 4.3 uložení reaktorové nádoby [13]**

Aktivní zóna reaktoru obsahuje 163 palivových kazet, každá palivová kazeta obsahuje 312 palivových proutků. Palivové peletky, obohacené přibližně na 5 % jsou obaleny zirkoniovou vrstvou. Palivová kazeta je dlouhá 457 cm. Jadernou reakci řídí 121 regulačních svazků, které ovládají reaktivitu aktivní zóny. Dále potlačují vznik xenonových oscilací, ke kterým může docházet v každém velkém reaktoru. Jde o jev spojený s jeho fyzickými rozměry a řídicí systém je uzpůsoben k jejich automatickému potlačování, takže nemohou představovat žádné ohrožení bezpečného provozu reaktoru. Xenonové oscilace vznikají v důsledku schopnosti jednotlivých částí reaktoru fungovat samostatně. Xenon vzniká při štěpení jaderného paliva a snižují reaktivitu aktivní zóny. Vlivem změny reaktivity v horní části reaktoru (částečné zasunutí regulačních tyčí) se výkon reaktoru přesune do spodní části, kde začne vznikat více xenonu, tím pádem se potlačí výkon v dolní části reaktoru, jako důsledek nechtěné absorpce neutronů xenonem, a výkon se přelije zpět do horní části reaktoru. [10]

Turbína VVER-1200 obsahuje 4 nízkotlaké díly a jeden vysokotlaký díl tu. Délka turbíny je celkem 52,3 m, délka celého turbosoustrojí je 74,5 m, ale můžou se pro jednotlivé elektrárny lišit. Turbínami protéká přibližně 6408 tun páry za hodinu o tlaku 6,8 MPa a vstupní teplotě 283 °C a výstupní teplotě 228 °C. [10]



**Obr. 4.4 Turbína v novovoronežské jaderné elektrárně [10]**

#### 4.2.1 Základní bezpečnostní systémy projektu AES-2006

Bezpečnostní systémy reaktoru VVER-1200 se skládají z několika částí. Nízkotlaký vstřikovací bezpečnostní systém, vysokotlaký vstřikovací bezpečnostní systém, reziduální odvod tepla, pasivní chlazení aktivní zóny, rychlé vstřikování koncentrované kyseliny borité, bezpečnostní systém odvodu plynů z aktivní zóny. Další bezpečnostní prvky jsou zaměřeny na ochranu primárního potrubí před vysokým tlakem, jedná se o přetlakové ochranné systémy a pasivní odvod tepla přes parogenerátory (hlavní funkce tohoto systému je využití přirozené cirkulace vzduchu přes tepelné výměníky, kde se ohřívá a je vypouštěn do atmosféry). VVER-1200 obsahuje dvojitý kontejment, který chrání elektrárnu před vnějšími vlivy (např. před pádem dopravního letadla) a také chrání okolní prostředí před případnými nehodami na elektrárně. Dalším bezpečnostním prvkem je lapač roztavené aktivní zóny. Tento systém v případě nehody s roztavením paliva zabrání tomu, aby se roztavené jaderné palivo dostalo mimo reaktor. [13]

Pasivní systém odvodu tepla z kontejmentu zajišťuje stabilní odvod tepla z kontejmentu za normálního provozu a v případě havárie typu LOCA a tavení aktivní zóny. Systém funguje i v případě selhání sprchového systému či výpadku elektrického napájení elektrárny. Systém pracuje na principu přirozené konvekce tepla. Teplý vzduch, který vznikne v kontejmentu, ohřívá vodu, která proudí přes tepelný výměník (voda – vzduch) umístěný v kontejmentu. Ohřátou vodu v kontejmentu tlačí studená voda směrem do tepelného výměníku, který je umístěn v akumulární nádrži (akumulační nádrž je umístěna mimo kontejment). Je uplatněn princip přirozené cirkulace a není třeba žádných čerpadel. V akumulární nádrži teplá voda předá teplo studené vodě. [13]

**Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru.** Hlavním smyslem systému pasivního chlazení parogenerátoru je zabránění roztavení aktivní zóny. Pasivní systém odvodu tepla z parogenerátoru v případě selhání čerpadel doplňování napájecí vody do parogenerátorů či prasknutí potrubí primárního okruhu (LOCA) je aktivován systém pasivního odvodu tepla z parogenerátoru. Parogenerátor se celý zaplní vodou z akumulární nádrže (akumulární nádrž je umístěna mimo kontejment). Jakmile je parogenerátor zaplněn vodou, vzniká parovodní směs, která je odváděna přes potrubí do výměníků tepla, které jsou umístěny v akumulární nádrži. Zde se voda ochladí a proudí zpět do parogenerátoru.

**Lapač roztavené aktivní zóny.** V případě havárie s tavením aktivní zóny teče po protavení reaktorové nádoby tavenina směrem k lapači roztavené aktivní zóny. Slouží k zachycení taveniny. Zařízení dále zajišťuje menší tvorbu plyných produktů tvořících se z roztavené aktivní zóny a chlazení taveniny. [13]

Díky těmto funkcím se snižuje tepelné a tlakové namáhání vnitřního kontejmentu. Tavenina je navíc ještě chlazena bórovou vodou skrze sprchové systémy. V lapači je umístěn tepelný výměník, který zajišťuje chlazení roztavené aktivní zóny. Tepelný výměník je potrubím spojen se zásobními šachtami s vodou a chladící médium chladí roztavenou aktivní zónu ve spodní části vnitřního koše a po jeho stranách. Vnitřní koš výměníku tepla je vyplněn speciální sloučeninou ocelové struktury, která je na bázi oxidu hlinitého a železitého ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Tento materiál zprostředkovává kontakt roztavené aktivní zóny s výměníkem tepla, přitékající chladící voda z kontrolních šachet společně s tímto materiálem zajišťuje redukci tvorby plyných produktů štěpení z roztavené aktivní zóny a také funguje jako absorbátor tepla a zajišťuje, aby byla roztavená aktivní zóna v podkritickém stavu.

**Systém kontroly vodíku v kontejmentu.** V kontejmentu jsou umístěny systémy pro kontrolu tvorby vodíku a systémy na jeho likvidaci v případě havárie. Vodík vzniká především radiolýzou vody a koroze. Kontejment je vybaven rekombinačními zařízeními pro udržení přípustné koncentrace vodíku, aby nedošlo k výbuchu. Rekombinační zařízení pracují na principu zpětné reakce, kdy se vodík sloučí s kyslíkem za vzniku vody, která následně stéká po stěnách kontejmentu. V projektu AES-2006 jsou použity katalytické rekombinátory. Katalytické rekombinátory umožňují rekombinaci vodíku na vodu již při teplotách okolo 0 °C. Katalyzátorem je zde nejčastěji platina a paladium. Katalytické rekombinátory jsou schopny pracovat již při koncentracích vodíku okolo 1 % a jsou schopny pracovat ve velkém rozsahu teplot a vlhkostí. [13]

### 4.3 KEPCO APR-1400

Jihokorejský jaderný reaktor APR-1400 je tlakovodní reaktor patřící mezi reaktory velkých výkonů, s tepelným výkonem 4000 MWt, elektrickým výkonem 1455 MWe a odpovídající účinností 35,1 %. Při vývoji nového reaktoru se vycházelo ze zkušeností získaných s reaktory OPR-1000. Vzhledem k tomu, že se vycházelo z amerického systému 80+, je zde řada podobností i s reaktorem firmy Westinghouse AP1000. Primární okruh má dva chladící okruhy. Typické jsou dva velké svislé parogenerátory, každý napájený dvěma cirkulačními čerpadly. Tlak v primárním okruhu je 15,5 MPa. Teplota chladiva na vstupu do reaktoru 290,6 °C a na výstupu z reaktoru 323,9 °C. Využívá se

jedna turbína s jedním vysokotlakým a třemi nízkotlakými díly s počtem otáček 1800 za minutu. [11]  
[11]

Aktivní zónu tvoří celkem 241 palivových souborů, palivový soubor je čtvercové geometrie a tvoří ho 16×16 palivových proutků s aktivní délkou 3,81 m. Palivo je ve formě UO<sub>2</sub> s průměrným obohacením 4,09 % o izotop U235.

Zvláštností tohoto projektu je, že APR-1400 nemá lapač aktivní zóny, jak je tomu u většiny projektů generace III+. V tomto projektu se uvažuje zaplavení šachty reaktoru vodou, čímž by se daná tavenina měla udržet uvnitř reaktorové nádoby. [12]



**Obr. 4.5 Elektrárna Shin Kori 3 a 4 [12]**

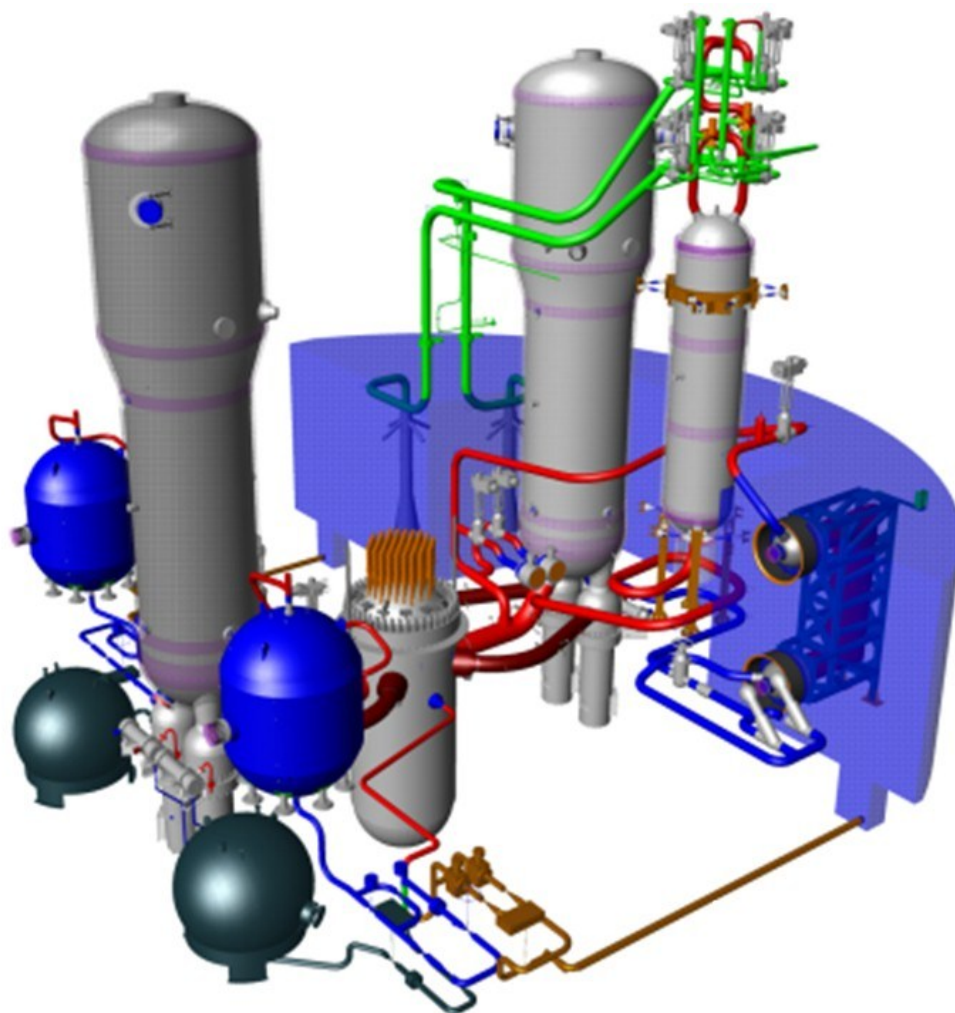
#### 4.4 Toshiba-Westinghouse AP1000

AP1000 je odvozen z menšího AP600. K dochlazení taveniny aktivní zony je navrženo využití pasivního zbytkového odvodu tepla. Žádná bezpečnostní čerpadla nebo ventilační systémy nejsou potřebné. Jako velkou výhodu svého projektu uvádí společnost takzvanou modulární výstavbu, kdy je elektrárna budována jako stavebnice z dílů, vyrobených jinde, pomocí jeřábů, což šetří čas a peníze, jelikož jednotlivé kusy lze vyrábět souběžně. S návratností pro firmu je to však komplikovanější a údajně se výhody takového způsobu projeví až tehdy, když získá zakázky minimálně na čtyři bloky v jednom regionu. [13]

První čtyři jednotky jsou stavěny v Číně, kde výstavba probíhá přesně podle plánu. Čínské bloky mají projektovaný výkon 3400 MWt a 1200 MWe až 1117 MWe do sítě. V Číně spolupracuje se SNPTC (State Nuclear Power Technology Corporation Ltd.) i SNERDI (Shanghai Nuclear Engineering Research and Design Institute) a plánují vyvinout na základě AP1000 pasivně bezpečný 1400 MWe



reaktor označovaný CAP 1400. Pokud bude možné využít pasivní systém i pro větší výkony, plánuje se zvýšit výkon až k většímu, třismýčkovému CAP2100.



Obr. 4.6 Koncepce primárního okruhu AP1000 [13]

#### 4.4.1 Základní bezpečnostní systémy projektu AP1000

Bezpečnostní systémy projektu AP1000 lze dělit na aktivní bezpečnostní systémy a pasivní bezpečnostní systémy.

**Aktivní bezpečnostní systémy.** Tyto systémy jsou v projektu AP1000 klasifikovány jako systémy, které se nepodílejí na řešení havarijních stavů, ale jsou určeny pro normální provoz a jsou řízeny pomocí kvalifikovaných operátorů (na rozdíl od pasivních bezpečnostních systémů). Aktivní bezpečnostní systémy, jsou konstruovány a provozovány tak, že nejsou vyžadovány tak časté kontroly, není nutná častá údržba a testování. Zároveň je možnost provádět jejich údržbu během provozu. Redundance těchto systémů je pouze 2 x 100 %. Nižší redundance oproti projektům EPR a MIR- 1200 (4x100 %) je způsobena právě klasifikací těchto systémů. Tím, že se přímo nepodílí na

řešení havárií, není nutná dle projektu AP1000 větší záloha. Příklady aktivních nebezpečnostních systémů [13] :

- Systém normálního doplňování primárního okruhu.
- Systém odvodu zbytkového tepla při normálním provozu.
- Systém pro kontrolu obsahu vodíku v kontejmentu.
- Pomocné systémy napájecí vody.
- Absorpční tyče šedé a černé pro řízení reaktivity za normálního provozu.
- Klimatizace, ventilace, vytápění.

Pro případ havárie, kdy není k dispozici elektrická energie vyrobená v jaderné elektrárně, jsou tyto systémy zálohovány diesel–generátory (2 x 4MWe + 2 x 35 kWe pro dobíjení akumulčních baterií) či akumulčními bateriemi. [13]

**Pasivní bezpečnostní systémy** jsou bezpečnostní systémy, které jsou nezávislé na vnitřních a vnějších zdrojích elektrické energie a na činnosti člověka. V těchto vlastnostech je jejich největší výhoda, přičemž zároveň významně snižují pravděpodobnost vzniku havárie díky tomu, že nemůže dojít k selhání funkce systémů nebo selhání člověka. Co se týče selhání člověka, tak projekt AP1000 deklaruje, že při těžkých haváriích není třeba zásah operátora po dobu až 72 hodin. Nezávislost pasivních bezpečnostních systémů je způsobena tím, že jsou tyto systémy založeny na přírodních silách (gravitace, přirozená cirkulace vzduchu, Pascalův zákon, aj.)

Mezi hlavní pasivní bezpečnostní systémy projektu AP1000 patří:

- Pasivní systém chlazení aktivní zóny.
- Hermetičnost kontejmentu.
- Pasivní systém chlazení kontejmentu.

Pasivní systém chlazení aktivní zóny reaktoru AP1000 plní dvě hlavní funkce:

1. Bezpečné chlazení aktivní zóny.
2. Zajištění odvodu zbytkového tepla z reaktoru.

**Havárie typu LOCA.** V případě prasknutí větve primárního okruhu dojde k náhlému poklesu tlaku v potrubí. Zároveň chladicí médium uniká z větve primárního okruhu, což znamená, že jaderný reaktor nemůže být dostatečně chlazen. Tomuto typu havárie se říká LOCA. Projekt AP1000 řeší havárii typu LOCA skrze pasivní systém chlazení aktivní zóny. [13]

V návrhu reaktoru AP1000 je obsaženo několik prvků zvyšujících výrobu energie a zároveň bezpečnost pracovníků jako:

- Osmnáctiměsíční palivový cyklus vedoucí k vyšší dostupnosti a nižším celkovým nákladům na palivo
- výrazně nižší požadavky na údržbu, montáž lešení, testování a inspekce
- menší vystavení záření a menší množství odpadu z elektrárny
- projekt s garantovanou šedesátiletou životností.

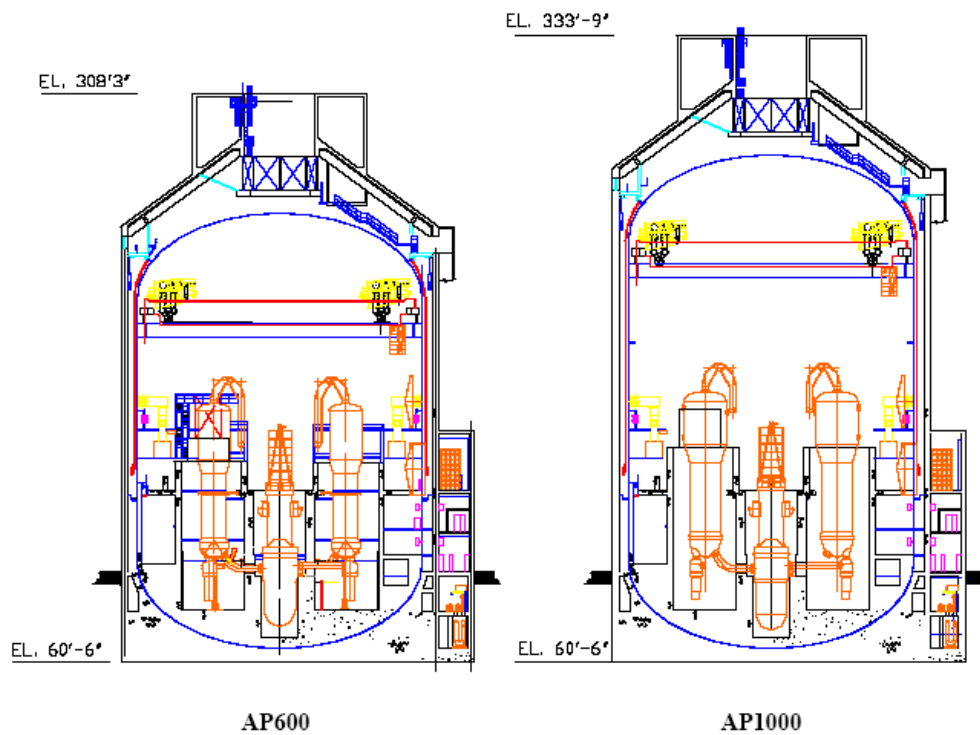


Figure 1 – Westinghouse AP600 and AP1000 Plants (Section)

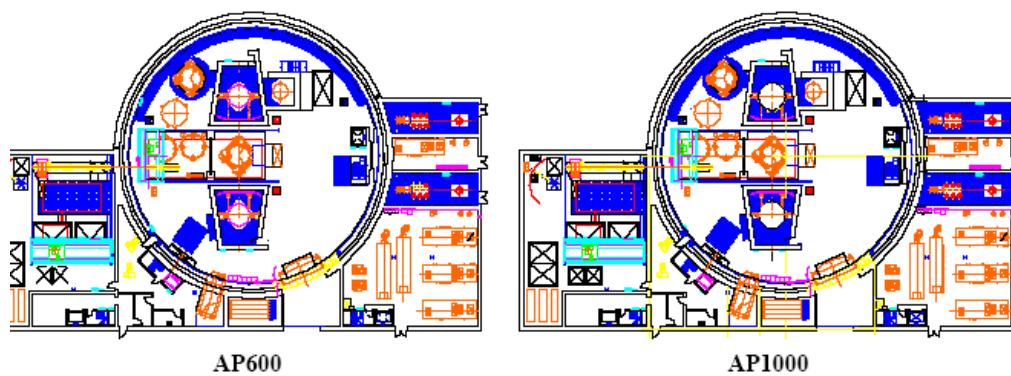


Figure 2 – Westinghouse AP600 and AP1000 Plants (Plan)

Obr. 4.7 Porovnání zastavěné plochy a objemu AP600 a AP1000 [13]

## 5 PROJEKTY JADERNÝCH BLOKŮ III+ GENERACE V EVROPĚ

V současné době je v Evropě různých fázích realizace celkem šest projektů jaderných elektráren III+ generace. Na bázi systému evropského tlakovodního reaktoru (EPR) jsou ve výstavbě tři projekty-Hinhley Point C, Flamanville 3 a Olkiluoto 3. Zbylé projekty jsou na platformě VVER-1200-Hanhikivi 1, Mochovce 3 a 4, Paks 5 a 6.

Je však nutno podotknout, že žádná z těchto jaderných elektráren v Evropě neběží podle svého původního plánu výstavby, a i reálné náklady jsou mnohem vyšší, než se předpokládalo před začátkem výstavby.

### 5.1 Hinkley Point C

Jaderná elektrárna Hinkley Point se nachází v hrabství Somerset na pobřeží Bristolského zálivu, 8 kilometrů západně od ústí řeky, ve Velké Británii.

Hinkley Point A byla postavena mezi lety 1957 a 1965. Elektrárnu tvořily dva bloky s plynem chlazenými reaktory Magnox (2x250 MWe). Oba bloky byly v roce 2000 odstaveny z provozu.

Stavba Hinkley Point B byla zahájena v roce 1967 a v roce 1973 byly uvedeny do provozu 2 pokročilé plynem chlazené reaktory (AGR) o elektrických výkonech 410 MWe. Elektrárnu od roku 2009 provozuje francouzský energetický koncern EDF (Électricité de France). [14]

První návrh na výstavbu nových jaderných elektráren na území Velké Británie pochází z července 2006, jakožto důsledek vládní energetické koncepce, která má zajistit energetickou bezpečnost státu a nahradit dosluhující jaderné elektrárny. V říjnu 2010 britská vláda schválila umístění dvou nových bloků jaderné elektrárny Hinkley Point C v Anglickém Somersetu. Jaderná elektrárna Hinkley Point C je první jadernou elektrárnou, která má být po více než 20 letech v Británii postavena (poslední spuštěnou elektrárnou byla elektrárna Sizewell B v roce 1995). [15]





**Obr. 5.1 Vizualizace jaderné elektrárny Hinkley Point C [15]**

Evropská komise v roce 2014 odsouhlasila plán britské vlády subvencovat stavbu elektrárny, která by nebyla schopná dodávat elektřinu za tržní cenu. Rakousko v červenci 2015 podalo proto příslušnou žalobu na Evropskou komisi k Soudnímu dvoru EU v Lucemburku kvůli schválené státní podpoře pro výstavbu a provoz elektrárny. Podle rakouské vlády by se subvence neměly vztahovat na jadernou energetiku, ale na obnovitelné zdroje. [16]

V září 2016 britská vláda potvrdila konečný projekt nové jaderné elektrárny Hinkley Point C. Projekt obou reaktorů typu EPR (2x1630 MW) Hinkley Point C bude mít na starosti francouzská elektrárenská společnost EDF s pomocí čínské státní firmy China General Nuclear (CGN). Její životnost je projektována na 60 let a na celkové výrobě elektřiny ve Velké Británii bude mít sedmiprocentní podíl. [17]

Podle původních plánů měla Hinkley Point C stát 6,7 miliard eur a elektřinu měla začít dodávat již ke konci roku 2017. Stavba však byla kvůli soudním sporům s Rakouskem zahájena až v roce 2018. V současné době se zahájení provozu odhaduje na konec roku 2027 a celkové náklady se odhadují na 22,3 miliard eur. [18]

## 5.2 Flamanville 3

Jaderná elektrárna Flamanville leží nedaleko stejnojmenné obce v departmentu Manche na severu Francie. První dva bloky byly uvedeny do provozu v letech 1986 a 1987. Oba bloky disponují tlakovodními reaktory P4 REP 1300 o výkonu 2x1300 MW. V únoru 2017 došlo k explozi a následnému požáru ve strokovně již fungujícího bloku. Nedošlo sice k úniku radioaktivních látek, ale v důsledku požáru bylo zraněno pět lidí. Jeden z reaktorů byl po explozi na krátkou dobu odstaven. [19]



**Obr. 5.2 Jaderná elektrárna ve Flamanville ve Francii [19]**

Výstavba třetího bloku začala v roce 2007 s odhadovaným rozpočtem 3,3 miliard eur. Původní termín dokončení byl stanoven na rok 2012. Jedná se o jeden z prvních projektů jaderných bloků postavených na systému EPR. Elektrický výkon tohoto bloku je 1650 MWe. Po dokončení výstavby Flamanville 3, chtěla francouzská energetická společnost EDF vyvážet reaktory EPR do celého celého světa. [20]

Plánovaný termín spuštění elektrárny je však od samého začátku doprovázen řadou zpoždění a problémů. Nejznámější je vyšší obsah uhlíku v oceli některých částí tlakové nádoby reaktoru. Musela být provedena řada testů, jak tato odchylka ovlivní vlastnosti příslušných dílů. Bylo zraněno V lednu 2018 byly dokončeny studené zkoušky reaktoru. Poté se však přišlo na problémy s některými svary v sekundární části chladicího systému. Testy jednotlivých systémů elektrárny se tak protahují. Horké zkoušky proto začly až v druhé půli roku 2018. To znamená, že ke spuštění elektrárny by mělo dojít až v roce 2020 s celkovými náklady až 10,9 miliardy eur. [21]

### 5.3 Olkiluoto 3

Jaderná elektrárna Olkiluoto je jednou ze dvou finských jaderných elektráren (druhou je jaderná elektrárna Loviisa s reaktory VVER). Jaderná elektrárna Olkiluoto se nachází na ostrově Olkiluoto v Botnickém zálivu, asi 25km severně od města Rauma. Skládá ze dvou varných jaderných reaktorů (BWR) o výkonu 860 MW. Výstavba probíhala mezi lety 1973 a 1979. V současné době je vlastněna firmu Teollisuuden Voima Oyj (TVO). [22]

Olkiluoto 3 je prvním projektem reaktoru EPR od francouzské společnosti Areva, který se začal stavět. Jeho výstavba začala v červenci 2005 s předpokládaným uvedením do provozu v květnu 2009. Odhadované náklady měly činit 3 miliardy euro.



**Obr. 5.3 již postavená část JE Olkiluoto 3 [23]**

Celá stavba se však v průběhu let musela vypořádat s celou řadou problémů a dokončení projektu tak bylo několikrát posunuto. Jeden z hlavních důvodů zpoždění výstavby byla špatná kooperace společnosti Areva se svými subdodavateli, kteří neměli se stavbou jaderných elektráren dostatek zkušeností a některé části stavby se musely přepracovávat. První nesrovnalosti se začaly projevovat již při betonování základové desky kontejnmentu. Také při konstrukci dvojité struktury kontejnmentu docházelo ke zpožděním z důvodů špatné komunikace se svářeči. Na základě těchto problémů během stavby došlo i ke sporu mezi Arevou a TVO. TVO požadovala odškodnění ušlého zisku a naopak Areva požadovala odškodnění od TVO za jimi vzniklé škody. Ke vzájemné dohodě došlo v březnu 2018, kdy Areva a TVO dosáhli dohody. [23]

Původně se v plánech počítalo ještě se čtvrtým blokem ve stejné lokalitě – plány na dostavbu tohoto bloku byly pozastaveny v polovině roku 2015, a to právě kvůli průtahům při stavbě třetího bloku. Podle posledních veřejně dostupných informací má být Olkiluoto 3 spuštěn v březnu 2021. [24]

## 5.4 Pakš 5 a 6

Jaderná elektrárna Paks leží ve středním Maďarsku, 5 km od města Paks a 100 km od Budapešti. Její výstavba probíhala mezi lety 1974 a 1987. V současné době má elektrárna v provozu čtyři reaktory VVER 440 typ213 s celkovým výkonem 1760 MWe, což pokrývá asi 40 % elektrické energie vyrobené v Maďarsku.



V březnu roku 2009 maďarský parlament předběžně schválil rozšíření elektrárny dostavbou dalších dvou jaderných bloků. Přes prvotní plány na vypsaní tendru na tento projekt nakonec maďarská vláda podepsala v lednu 2014 smlouvu s ruským Rosatomem.

Plánované rozšíření počítá s výstavbou dvou nových bloků VVER 1200, každý o výkonu 1 200 MWe. Cena projektu se pohybuje okolo 12,5 miliard euro, přičemž Rusko pomůže Maďarsku s financováním půjčkou ve výši 10 mld euro, která by měla být splácena po dobu 21 let od uvedení bloků do provozu. Zbýlá část potřebných financí bude zajištěna maďarskou stranou. [25]

V červnu 2020 bude podána žádost o stavební povolení. Pokud se nevyskytne žádná zásadní komplikace, o rok později bude povolení vydáno a na staveništi se rozběhnou práce v plném rozsahu. V současné době však již probíhají přípravné práce, které připravují lokalitu, například se překládá teplovod pro vytápění města, aby nevedl přes pozemky budoucí dvojice bloků. Očekávaný termín dokončení a spuštění elektrárny se nyní ohdádá na rok 2027. [26]



**Obr. 5.4 vizualizace bloků VVER-1200 vedle stávající elektrárny [26]**

## 5.5 Mochovce 3 a 4

Jaderná elektrárna Mochovce je slovenská jaderná elektrárna, která leží na místě bývalé stejnojmenné obce mezi městy Nitra a Levice a je ve vlastnictví česko-italsko-slovenské společnosti Slovenské elektrárne. Elektrárna provozuje dva jaderné tlakovodní reaktory generace II. typu VVER 440 typ 213, každý s výkonem 470 MW.

Výstavba JE Mochovce začala v listopadu 1982, ale v roce 1991 byla pro nedostatek financí zastavena. V roce 1995 slovenská vláda schválila plán na dostavbu dvou bloků JE Mochovce za podmínky doplnění zastaralé sovětské technologie modernějšími západními bezpečnostními prvky. Bloky byly uvedeny do provozu v červenci 1998 a v prosinci 1999. Mají plánovanou životnost do roku 2058, respektive 2060. Každý blok vyrobí ročně asi 3 000 GWh, což pokrývá 10 % spotřeby elektrické energie Slovenska.

Třetí a čtvrtý blok jaderné elektrárny Mochovce jsou znovu ve výstavbě od listopadu roku 2008. Ačkoliv tento typ reaktoru původně spadá do starší generace II., při použití moderních bezpečnostních prvků jej lze zařadit do III.+ generace, která splňuje nové bezpečnostní předpisy. Dle původního plánu měly být uvedeny do provozu v roce 2013. Očekávaný termín spuštění elektrárny je konec roku 2020.

O dostavbě třetího a čtvrtého bloku se rozhodlo až po odkoupení dvoutřetinového podílu ve společnosti Slovenské elektrárne italskou společností Enel. Projekt dostavby pak byl zahájen 3. listopadu 2008.

V roce 2013 Nejvyšší soud Slovenské republiky rozhodl o tom, že dodatečné povolení pro dostavbu třetího a čtvrtého bloku neodpovídá povolení z roku 1986, nicméně povolení nezrušil, a proto stavební práce probíhaly bez přerušení dál.

Hlavním problémem při výstavbě byly zvýšené nároky na bezpečnost v důsledku havárie v japonské elektrárně Fukušima. Doba výstavby z tohoto důvodu se prodloužila o 9-12 měsíců.

Pro dostavbu elektrárny byl zvolen dodavatelský model označovaný jako multi-contract. Celá stavba tedy byla ze strany Slovenských elektráren rozdělena mezi přibližně 100 dodavatelů. Úkolem společnosti Slovenské elektrárne byl jejich výběr, kontrola a koordinace. Právě nezvládnutí role investora se zřejmě stalo hlavním důvodem, proč se stavba prodlužuje až do dnešního dne.

Poslední prodloužení výstavby jsou způsobené zkouškami, které ukázaly na některé nedostatky. Během již opakované zkoušky úřad jaderného dozoru zjistil problémy na součásti zařízení, které slouží k udržení stálého tlaku v primárním okruhu bloku. V hermetické zóně, kde jsou umístěna základní technologická zařízení, byla zase snížena kvalita vzduchu. Důvodem patrně byly výpary z použitých nátěrů.

Náklady v roce 2007 byly odhadovány na 2,6 miliard eur. Dle posledních odhadů by náklady měly přesáhnout 5,67 miliard eur, přičemž se nemusí jednat o konečné číslo. [27]



**Obr. 5.5 Chladicí věže jaderné elektrárny Mochovce [27]**

## 6 Tepelný výpočet parního generátoru

Základní vztahy a konstanty pro výpočty vycházejí z [28].

Pro výpočet jsem zvolil svislý parní generátor 1600 MW<sub>t</sub>, byly tadány tyto parametry:

Tepelný výkon parního generátoru	$Q = 1600$	[MW]
----------------------------------	------------	------

Parní výkon parního generátoru	$G = 3200$	[t·h <sup>-1</sup> ]
--------------------------------	------------	----------------------

### Primární okruh:

Teplota média vstupní	$t_1 = 330$	[°C]
-----------------------	-------------	------

Teplota média výstupní	$t_2 = 290$	[°C]
------------------------	-------------	------

Tlak média	$p_1 = 16,5$	[MPa]
------------	--------------	-------

Množství media	$m_v = 7200$	[kg·s <sup>-1</sup> ]
----------------	--------------	-----------------------

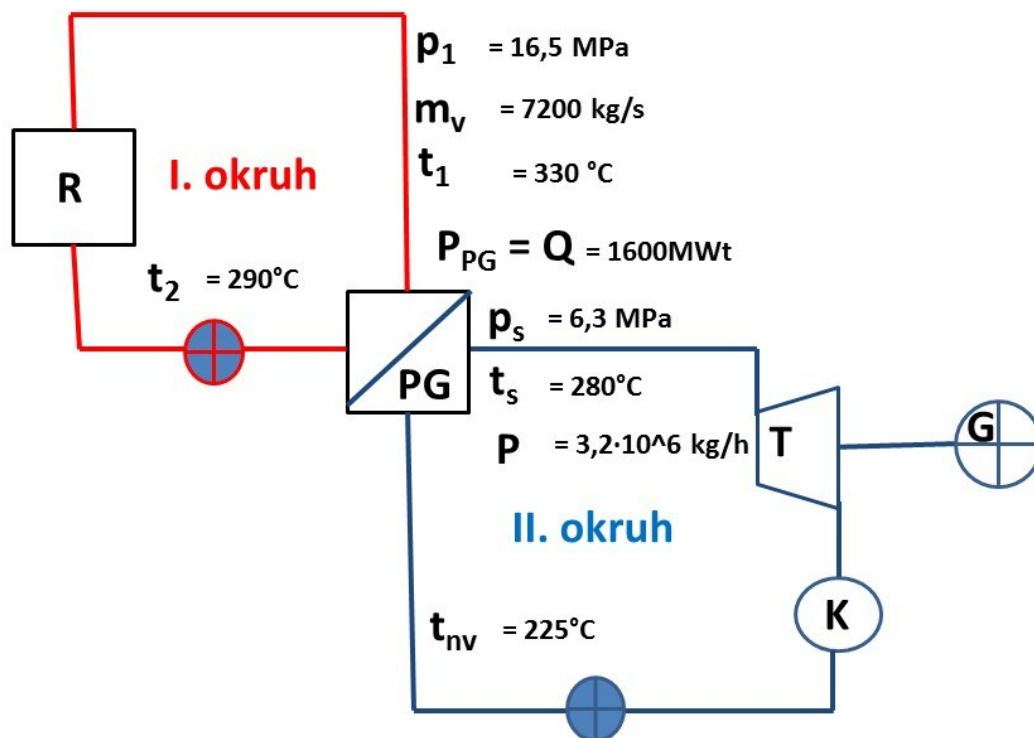
### Sekundární okruh:

Teplota napájecí vody	$t_{nv} = 225$	[°C]
-----------------------	----------------	------

Teplota syté páry	$t_s = 280$	[°C]
-------------------	-------------	------

Tlak syté páry	$p_s = 6,3$	[MPa]
----------------	-------------	-------

Množství syté páry	$P = 3,2 \cdot 10^6$	[kg·h <sup>-1</sup> ]
--------------------	----------------------	-----------------------



Obr. 6.1 Schéma okruhu se zadanými parametry

## 6.1 Určení potřebných veličin z tabulek

**Stanovení střední teploty:**

$$t_{stř} = \frac{t_1 + t_2}{2} \quad (6.1)$$

$$t_{stř} = \frac{330 + 290}{2}$$

$$t_{stř} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$$

Pro tuto teplotu  $t_{stř} = 310 \text{ }^\circ\text{C}$  určíme veličiny z tabulek termomechaniky [29]:

Měrný objem	$v = 0,0014586$	$[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$
Hustota	$\rho = 685,6$	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
Kinematická viskozita	$\nu = 0,1239 \cdot 10^{-6}$	$[\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$
Dynamická viskozita	$\eta = \nu \cdot \rho = 0,1239 \cdot 10^{-6} \cdot 685,6 = 8,482 \cdot 10^{-5}$	$[\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}]$
Součinitel tepelné vodivosti	$\lambda = 0,5198$	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
Měrná tepelná kapacita	$c_p = 6368,3$	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

**Prandtlovo kritérium:**

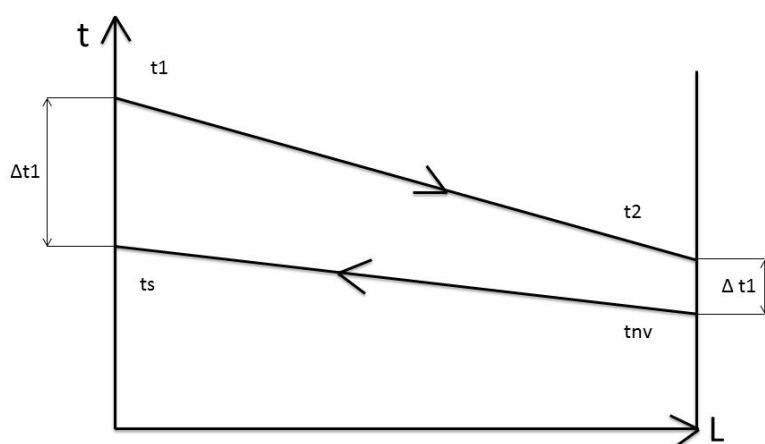
$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (6.2)$$

$$Pr = \frac{8,482 \cdot 10^{-5} \cdot 6368,3}{0,5198}$$

$$Pr = 1,039 [-]$$

$$\text{Volím } k_0 = 3,35 [\text{kW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

## 6.2 Střední logaritmický spád



**Obr. 6.2 diagram t-L**

$$\Delta t_1 = t_1 - t_s \quad (6.3)$$

$$\Delta t_1 = 330 - 280$$

$$\Delta t_1 = 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{nv} \quad (6.4)$$

$$\Delta t_1 = 290 - 225$$

$$\Delta t_1 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{střlog} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\ln \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}} \quad (6.5)$$



$$\Delta t_{stř_{log}} = \frac{50 - 65}{\ln \frac{50}{65}} = 57,17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

### 6.3 Určení součinitele přestupu tepla mezi vodou I a parovodní směsí II

#### 6.3.1 Výpočet teplosměnné plochy, volba trubek

Volím trubku  $\varnothing 16 \times 1,5$  [mm] materiál 08Ch18N10T

Rychlost proudění média v primárním okruhu  $w = 6,5$  [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ]

**Celková průtočná plocha:**

$$S_v = \frac{m_v}{w \cdot \rho} \quad (6.6)$$

$$S_v = \frac{7200}{6,5 \cdot 685,6}$$

$$S_v = 1,616 \text{ } m^2$$

**Průtočná plocha jedné trubky:**

$$S_{stř} = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad (6.7)$$

$$S_{stř} = \frac{\pi \cdot 0,013^2}{4}$$

$$S_{stř} = 1,327 \cdot 10^{-4} \text{ } m^2$$

**Počet trubek:**

$$n = \frac{S_v}{S_{stř}} \quad (6.8)$$

$$n = \frac{1,616}{1,327 \cdot 10^{-4}}$$

$$n = 12\,178 \text{ ks}$$

#### 6.3.2 Určení součinitele přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubkou

Určíme parametry sekundárního okruhu pro tlak  $p = 6,3$  [MPa]

Entalpie napájecí vody při  $t_{nv} = 225$  [ $^\circ\text{C}$ ]:  $i' = 990,4$  [ $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

Entalpie syté kapaliny při  $t_s = 280$  [ $^\circ\text{C}$ ]:  $i_s' = 1236$  [ $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

Entalpie syté páry při  $t_s = 280$  [ $^\circ\text{C}$ ]:  $i_s'' = 2780$  [ $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

Výparné teplo při daném tlaku  $l_v = 1554$  [ $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

**Reynoldsovo číslo:**

$$Re = \frac{w \cdot d_2}{\nu} \quad (6.9)$$

$$Re = \frac{6,5 \cdot 0,013}{0,1239 \cdot 10^{-6}}$$

$$Re = 682\,002 [-]$$

**Nusseltovo číslo:**

Dittus-Boelterova rovnice [30]:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0,4} \quad (6.10)$$

$$Nu = 0,023 \cdot 682002^{\frac{4}{5}} \cdot 1,039^{0,4}$$

$$Nu = 1084,93 [-]$$

Gnielskiho vztah pro turbulentní proudění v kruhové trubce [30]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{f}{8}\right) \cdot (Re - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{f}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \quad (6.11)$$

$$Nu = \frac{\left(\frac{0,0124}{8}\right) \cdot (682002 - 1000) \cdot 1,039}{1 + 12,7 \cdot \left(\frac{0,0124}{8}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(1,039^{\frac{2}{3}} - 1\right)}$$

$$Nu = 1084,73 [-]$$

Kde  $f$  je Darcyho koeficient tření, který může být získán pro hladké trubky z Petukhova vztahu [30]:

$$f = (0,79 \cdot \ln(Re) - 1,64)^{-2} \quad (6.12)$$

$$f = (0,79 \cdot \ln(628002) - 1,64)^{-2}$$

$$f = 0,0124$$

**Součinitel přestupu tepla mezi primárním médiem a teplosměnnou trubkou:**

$$\alpha_1 = Nu \cdot \frac{\lambda}{d_2} \quad (6.13)$$

$$\alpha_1 = 1084 \cdot \frac{0,5198}{0,013}$$

$$\alpha_1 = 43\,035 [W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}]$$

## 6.4 Součinitel přestupu tepla mezi stěnou trubky a parovodní směsí

Vycházíme ze vztahu pro bublinkový var  $\alpha_2 = A \cdot q^n$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

Pro čistý povrch teplosměnné plochy jsme zvolili dle literatury exponent  $n = 0,7$ .

Hodnotu středního tepelného toku nejprve zvolím  $q = 210$  [ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ ] a poté ji iterační metodou upřesníme

**Výpočtová konstanta A závisí na teplotě syté páry**

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 \cdot (t_s - 100)} \cdot \frac{4,186}{3600} \quad (6.14)$$

$$A = \frac{100}{3,3 - 0,0133 \cdot (280 - 100)} \cdot \frac{4,186}{3600}$$

$$A = 0,128$$

**Součinitel přestupu tepla:**

$$\alpha_2 = A \cdot q^n \quad (6.15)$$

$$\alpha_2 = 0,128 \cdot 210^{0,7}$$

$$\alpha_2 = 5,4 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

## 6.5 Určení součinitele prostupu tepla

Pro zvolený materiál 08Ch18N10T je součinitel tepelné vodivosti  $\lambda_{st} = 18,69$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

**Výsledný součinitel prostupu tepla:**

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} \cdot \frac{d_1}{d_2} + \frac{d_1}{2 \cdot \lambda_{st}} \cdot \ln \frac{d_1}{d_2} + \frac{1}{\alpha_1}} \quad (6.16)$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{43035} \cdot \frac{0,016}{0,013} + \frac{0,016}{2 \cdot 18,69} \cdot \ln \frac{0,016}{0,013} + \frac{1}{5400}}$$

$$k = 3304 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]} = 3,304 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}\text{]}$$

## 6.6 Kontrolní výpočty

**Tepelný tok:**

$$q = k \cdot \Delta t_{st\log} \quad (6.17)$$

$$q = 3,304 \cdot 57,17$$

$$q = 188,7 \text{ [kW} \cdot \text{m}^{-2}\text{]}$$

**Parní výkon parního generátoru:**

$$G = \frac{Q}{l_v + 1,01(i'_s - i')} \quad (6.18)$$

$$G = \frac{1600000}{1554 + 1,01(1236 - 990,4)}$$

$$G = 887,87 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 3196,35 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

Kde  $i'_s$  je entalpie syté kapaliny při  $t_s = 280$  [°C]

**Tepelný výkon:**

$$Q = G \cdot (i''_s - i') \quad (6.19)$$

$$Q = 887,87 \cdot (2780 - 990,4)$$

$$Q = 1588932 \text{ kW} = 1588 \text{ MW}$$

## 6.7 Určení velikosti teplosměnné plochy

$$S = \frac{Q}{g} \quad (6.20)$$

$$S = \frac{1600000}{207,25}$$

$$S = 7720 \text{ m}^3$$

**Pro jednu smyčku:**

$$L_\Sigma = \frac{S}{\pi \cdot d_1} \quad (6.21)$$

$$L_\Sigma = \frac{7720}{\pi \cdot 0,016}$$

$$L_\Sigma = 153\,587 \text{ m}$$

**Stanovení délky jedné trubky:**

$$L_{stř} = \frac{L_\Sigma}{n} \quad (6.22)$$

$$L_{stř} = \frac{153587}{12178} = 12,6 \text{ m}$$

## 7 ZÁVĚR

Jak plyne z textu této práce, postavit v této době jadernou elektrárnu nejmodernější III.+ generace v Evropské unii je velice náročné. Zadavatel a investor jsou nuceni čelit velkému množství legislativních omezení a vypořádat se s kritickým smýšlením k jaderné energetice od velké části společnosti. Dalším problémem při stavbě jaderných elektráren jsou obrovské investiční náklady. Z těchto omezení tak vyplývá poměrně dlouhá doba výstavby nových bloků.

I přes tyto faktory je v současnosti ve výstavbě několik jaderných elektráren v různých stádiích dokončování a většina z nich se bude v blízkém období spouštět do ostrého provozu.

Na základě těchto zkušeností z výstavby těchto nových bloků se jeví jako nejlepší varianta pro dostavbu jaderné elektrárny Dukovany ruský projekt VVER-1200. Předchůdci těchto reaktorů dodnes bez problému fungují v obou našich jaderných elektrárnách a také výrobce má bohaté zkušenosti z výstavby těchto reaktorů v celém světě. Největším konkurentem zřejmě bude americko-japonský projekt AP1000.

Svislý parní generátor je sestaven ze 12 178 trubek z materiálu 08Ch18N10T o rozměrech  $\varnothing 16 \times 1,5$  [mm] a střední délkou trubek 12,6 m. Parní výkon parního generátoru je 3196,35 MW a tepelný výkon je 1588 MW. Médium v primárním okruhu proudí rychlostí  $6,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### Poděkování

Děkuji touto formou vedoucímu mé bakalářské práce prof. Ing. Pavlovi Kolatovi, DrSc., za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytl při psaní mé práce.

## 8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DUFKOVÁ, Marie. Jak se obohacuje jaderné palivo. *TŘÍPÓL – časopis pro studenty o vědě a technice* [online]. 2014, 26. března 2008 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.3pol.cz/cz/rubriky/jaderna-fyzika-a-energetika/579-jak-se-obohacuje-jaderne-palivo>
- [2] KUSALA, Jaroslav. JADERNÝ REAKTOR. *Miniencyklopedie Jaderná energetika Součást vzdělávacího programu SVĚT ENERGIE* [online]. 2004 [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/edee/content/microsites/nuklearni/k35.htm>
- [3] ZÁKLADNÍ TYPY JADERNÝCH REAKTORŮ. *SKUPINA ČEZ* [online]. [cit. 2020-03-24]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/o-cez/vyrobní-zdroje/jaderna-energetika/je-ve-svete/zakladni-typy-jadernych-reaktoru>
- [4] Jaderná energetika. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_energetika](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_energetika)
- [5] Generace jaderných reaktorů – jaké generace máme, čím se navzájem liší. *Atominfo.cz* [online]. 2016 [cit. 2020-02-24]. Dostupné z: <http://atominfo.cz/2016/03/generace-jadernych-reaktoru-jake-generace-mame-cim-se-navzajem-lisi/>
- [6] WAGNER, Vladimír. Reaktory III. generace. *Objective Source E- Learning* [online]. Telč: Osel, 2008 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <http://www.osel.cz/3531-reaktory-iii-generace.html>
- [7] THOMAS, Steve. Slabiny uchazečů o výstavbu nových reaktorů v ČR: přehled globálního trhu pro moderní typy jaderných elektráren [online]. Uhlířské Janovice: Aliance pro energetickou soběstačnost, 2017 [cit. 2020-02-25]. ISBN 978-80-906270-8-6. Dostupné z: [https://cz.boell.org/sites/default/files/slabiny\\_reaktoru\\_o\\_vystavbu\\_novych\\_reaktoru\\_steve\\_thomas.pdf](https://cz.boell.org/sites/default/files/slabiny_reaktoru_o_vystavbu_novych_reaktoru_steve_thomas.pdf)
- [8] Leverenz, R., Gerhard, L., Göbel, A., The European Pressurized Water Reactor: A Safe and Competitive Solution for Future Energy Needs [online], International Conference - Nuclear Energy for New Europe, September 2004 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: [https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/37/086/37086871.pdf](https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/086/37086871.pdf)
- [9] SUK, Pavel. EPR – Evropský tlakovodní reaktor. *Idnes.cz/* [online]. Praha: MAFRA, 2016 [cit. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=502372>
- [10] SUK, Pavel. Pokročilý tlakovodní reaktor VVER-1200 generace III+. *Idnes.cz/* [online]. Praha: MAFRA, 2016 [cit. 2020-02-27]. Dostupné z: <https://pavelsuk.blog.idnes.cz/blog.aspx?c=562002>

[11] WAGNER, Vladimír. Korejský jaderný program - historie, současnost a potenciál pro ČR. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2019, 6. květena 2019 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/nazory/korejsky-jaderny-program-historie-soucasnost-potencial-cr/>

[12] PELTAN, Tomáš. APR-1400 – parametry, historie, specifikace. *Atominfo.cz* [online]. 2018, 3.5.2018 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2018/05/apr-1400-parametry-historie-specifikace/>

[13] KOLAT, P.: Úvod do jaderné energetiky, Skripta VŠB TU Ostrava, 2012

[14] [10.1] Jaderná elektrárna Hinkley Point. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Hinkley\\_Point](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Hinkley_Point)

[15] BUDÍN, Jan. Infografika: Příběh jaderné elektrárny Hinkley Point C. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2017, 27. leden 2017 [cit. 2020-03-09]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/pribeh-jaderne-elektrarny-hinkley-point-c>

[16] Britové mají problém: Rakousko napadlo rozhodnutí o podpoře elektrárny Hinkley. *E15.cz* [online]. 6. července 2015 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://www.e15.cz/byznys/prumysl-a-energetika/britove-maji-problem-rakousko-napadlo-rozhodnuti-o-podpore-elektrarny-hinkley-1206960>

[17] Británie schválila výstavbu jaderné elektrárny Hinkley Point C. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2016, 15. září 2016 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-evropa/britanie-schvalila-vystavbu-nove-jaderne-elektrarny>

[18] MAJLING, Eduard. EDF: Jaderné elektrárně Hinkley Point C hrozí zdražení až o 15 % a zpoždění projektu více než o rok. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2019, 28. září 2019 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-evropa/edf-jaderne-elektrarne-hinkley-point-c-hrozi-zdrazeni-az-15-zpozdeni-projektu-vice-nez-rok>

[19] V jaderné elektrárně ve Francii došlo k explozi. Pět lidí se otrávil, jaderný materiál ale neunikl. *Aktuálně.cz* [online]. 2017, 9. 2. 2017 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://zpravy.aktualne.cz/zahranici/v-jaderne-elektrarne-ve-francii-doslo-k-explozi-unik-radiace/r~cf34b78eeeb611e6bb37002590604f2e/>

[20] Flamanville-3 – běh na dlouhou trať. *Atominfo.cz* [online]. 2011, 29.7.2011 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2011/07/flamanville-3-beh-na-dlouhou-trat/>

[21] WAGNER, Vladimír. Nové jaderné reaktory III+ generace v provozu - část 1. *Oenergetice* [online]. Třebíč, 2018, 17. červenec 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/nove-jaderne-reaktory-iii-generace-provozu-cast-1>

[22] Jaderná elektrárna Olkiluoto. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2020, 28. 8. 2018 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1\\_elektr%C3%A1rna\\_Olkiluoto](https://cs.wikipedia.org/wiki/Jadern%C3%A1_elektr%C3%A1rna_Olkiluoto)



[23] WALTER, Daniel. Jaderná elektrárna Olkiluoto 3 bude mít speciální asfaltové tlumiče vibrací. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2019, 31. květen 2019 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-olkiluoto-3-bude-mit-specialni-asfaltove-tlumice-vibraci>

[24] VOŘÍŠEK, Martin. Olkiluoto 3: Ztráta zkušeností a ambiciózní plány stojí za více než desetiletým zpožděním. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2020, 5. březen 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/konceptolkiluoto-3-ztrata-zkusenosti-ambiciozni-plany-stoji-za-vice-nez-desetiletym-zpozdenim>

[25] VOŘÍŠEK, Martin. Jak je to s výstavbou jaderných bloků v Evropě? *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2015, 9. květen 2015 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-evropa/jak-je-to-s-vystavbou-jadernych-bloku-v-evrope>

[26] Práce v Paks II se rozbíhají, naplno se rozjedou až v roce 2021. *Atominfo.cz* [online]. 2020, 24.2.2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://atominfo.cz/2020/02/prace-v-paks-ii-se-rozbihaji-naplno-se-rozjedou-az-v-roce-2021/>

[27] MAJLING, Eduard. Jaderná elektrárna Mochovce: Dostavba bloku 3 a 4. *Oenergetice.cz* [online]. Třebíč, 2020, 10. březen 2020 [cit. 2020-04-23]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/jaderne-elektrarny/jaderna-elektrarna-mochovce-dostavba-bloku-3-4>

[28] HEJZLAR, Radko. Stroje a zařízení jaderných elektráren. 2. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01220-4.

[29] KADLEC, Zdeněk. *Termomechanika: návody do cvičení*. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1736-1.

[30] PAVLŮ, Jaroslav. *Vývoj výpočetního modelu a metodiky pro výpočet kondenzátoru s minikanálky* [online]. Brno, 2012 [cit. 2020-01-12]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=59007](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=59007). Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně.

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 Schéma tlakovodní jaderné elektrárny [2] .....	11
Obr. 2.2 Schéma varného reaktoru [3] .....	13
Obr. 2.3 Schéma reaktoru CANDU [3] .....	13
Obr. 2.4 Schéma reaktoru MAGNOX [3] .....	14
Obr. 3.1 Historický vývoj generací jaderných reaktorů [6] .....	15
Obr. 3.2 Nákres reaktoru CP-1 [4] .....	16
Obr. 3.3 Reaktorový sál JE Jaslovské Bohunice A1 [5] .....	17
Obr. 3.4 Jaderná elektrárna Dukovany [5] .....	18
Obr. 3.5 druhý blok kanadské jaderné elektrárny Gentilly – první reaktor typu CANDU-6 [5] ..	19
Obr. 4.1 Celková koncepce projektu EPR [13] .....	22
Obr. 4.2 čtyřsmýčkové uspořádání primárního okruhu EPR [13] .....	23
Obr. 4.3 uložení reaktorové nádoby [13] .....	25
Obr. 4.4 Turbína v novovoronežské jaderné elektrárně [10] .....	26
Obr. 4.5 Elektrárna Shin Kori 3 a 4 [12] .....	28
Obr. 4.6 Koncepce primárního okruhu AP1000 [13] .....	29
Obr. 4.7 Porovnání zastavěné plochy a objemu AP600 a AP1000 [13] .....	31
Obr. 5.1 Vizualizace jaderné elektrárny Hinkley Point C [15] .....	33
Obr. 5.2 Jaderná elektrárna ve Flamanville ve Francii [19] .....	34
Obr. 5.3 již postavená část JE Olkiluoto 3 [23] .....	35
Obr. 5.4 vizualizace bloků VVER-1200 vedle stávající elektrárny [26] .....	36
Obr. 5.5 Chladicí věže jaderné elektrárny Mochovce [27] .....	37
Obr. 6.1 Schéma okruhu se zadanými parametry .....	39
Obr. 6.2 diagram t-L .....	40

## 10 PŘÍLOHY

## Příloha č. 1 – Svislý parní generátor

